

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vilūnė LAPINSKIENĖ

# PASTATŲ ENERGINIO FUNKCIONALUMO VERTINIMAS INTEGRUOTAME PASTATO PROJEKTAVIME

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)



Vilnius LEIDYKLA  
TECHNIKA 2019

Disertacija rengta 2012–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

### **Vadovas**

prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

### **Pirmininkas**

prof. dr. Jurgita ANTUCHEVIČIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

### **Nariai:**

doc. dr. Nerija BANAITIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

dr. Raimondas PABARČIUS (Lietuvos energetikos institutas, energetika ir termoinžinerija – T 006),

doc. dr. Vladimir POPOV (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

prof. habil. dr. Mirosław ŻUKOWSKI (Balstogės technologijos universitetas, Lenkija, energetika ir termoinžinerija – T 006).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2019 m. rugpjūčio 26 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. liepos 25 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-029-M mokslo literatūros knyga  
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-186-7

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Vilūnė Lapinskienė, 2019

[vilune.lapinskiene@vgtu.lt](mailto:vilune.lapinskiene@vgtu.lt)

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Vilūnė LAPINSKIENĖ

# THE ASSESSMENT OF BUILDING ENERGY FUNCTIONALITY IN THE INTEGRATED BUILDING DESIGN

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
CIVIL ENGINEERING (T 002)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2019.

**Supervisor**

Prof. Dr Habil. Vytautas MARTINAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

**Chairman**

Prof. Dr Jurgita ANTUCHEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

**Members:**

Assoc. Prof. Dr Nerija BANAITIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Dr Raimondas PABARČIUS (Lithuanian Energy Institute, Energetics and Power Engineering – T 006),

Assoc. Prof. Dr Vladimir POPOV (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Habil. Mirosław ŻUKOWSKI (Białystok University of Technology, Poland, Energetics and Power Engineering – T 006).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 26 August 2019**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 25 July 2019.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

# Reziumė

Šiuolaikinis projektavimo procesas neatsiejamas nuo naujų technologijų taikymo bei tampraus projekte dalyvaujančių grupių bendradarbiavimo. Todėl pagrindinis disertacijos tikslas – sudaryti pastato koncepcijos rengimo technologiją bei procedūrų seką, kurioje taikomi metodai ir priemonės leistų efektyviau rasti vartotojo pirminius reikalavimus ir projektavimo komandos gebėjimus suderinantį, energetiškai funkcionalų pastato koncepcijos projektinį sprendinį.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai ir šeši priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autorės paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas apžvelgti pastatų projektavimo procesui skirtą mokslinę literatūrą. Čia aptariama pastatų projektavimo metodai, šiuolaikinės skaitmeninės projektavimo, modeliavimo ir optimizavimo priemonės, pasyvaus energijos taupymo projektavimo strategijos ir pastato apvalkalo skirtingų architektūrinių-konstruktinių derinių efektyvumo didinimo keliai.

Antrajame skyriuje pateikta darbe sukurta pastato koncepcijos rengimo technologija ir detalizuojami joje naudojami metodai.

Trečiajame skyriuje pademonstruotas pastato koncepcijos rengimo technologijos taikymas energetinio funkcionalumo vertinimui bei palyginimas su įvykdytu realiu tradicinio projektavimo procesu.

Disertacijos tema paskelbti 8 moksliniai straipsniai: vienas – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazėse referuojamame leidinyje, turinčiame citavimo rodiklį, 3 – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose Clarivate Analytics duomenų bazėje Proceedings, 2 – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose, 2 – konferencijų pranešimų medžiagose. Disertacijos tema perskaityti 5 pranešimai tarptautinėse konferencijose Lietuvoje ir Rusijoje.

# Abstract

The modern building design process is inseparable from the application of new technologies and the co-operation of all groups involved in the project. Therefore, the main goal of this doctoral dissertation – to develop a concept building design technology and a series of procedures, in which the methods and tools applied enable a more efficient design of a building concept that is compatible with the user's initial requirements and the capabilities of the design team.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions and reference list, a list of publications on the topic of the dissertation by the author and six annexes.

The introductory chapter of the dissertation presents the research problem, relevance of the work, describes the object of the research, formulates the aim and the objectives of the work, research methodology, scientific novelty, practical significance of the work results, defended statements. At the end of the introductory chapter, the publications and reports published by the author on the topic of the dissertation and the structure of the dissertation are presented

The first chapter is devoted for the literature review. It specifies building design methods, modern digital building design process, modeling and optimization tools, passive energy-efficient building design strategies and architectural-structural combinations of building envelope.

The second chapter provides the concept building design technology and describes the methods used in it, in more detail.

The third chapter presents the application of the concept building design technology to assess the building energy functionality and comparison with actual traditional building design process.

The subject of the dissertation is published in 8 articles: 1 is in the collection of articles included in the list of Clarivate Analytics Web of Science, 3 in the conference materials listed in the Proceedings database, 2 in the magazine cited in the Inspec database, 2 in the reviewed international conference materials. On the topic of dissertation 5 publications were presented at the international conferences in Lithuania and Russia.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

$a_j$  – galimas alternatyvus variantas;  
 $D$  – normalizuota sprendimų priėmimo matrica;  
 $d_{ij}$  – bedimensinių įvertintų reikšmių suma;  
 $I$  – informacijos turinys;  
 $m$  – kriterijų skaičius;  
 $n$  – lyginamų variantų skaičius;  
 $P$  – patikimumo reikšmė;  
 $q_i$  –  $i$  kriterijaus reikšmingumas;  
 $Q_j$  – santykinis reikšmingumas;  
 $S_{-j}$  – minimizuojanti įvertintų normalizuotų rodiklių suma;  
 $S_{+j}$  – maksimizuojanti įvertintų normalizuotų rodiklių suma;  
 $x_{ij}$  –  $i$  kriterijaus reikšmė  $j$  sprendimo variante.

## Indeksai

$A$  – plotas, m<sup>2</sup>;  
 $\text{CO}_2$  – CO<sub>2</sub> dujų emisijos;

$g$  – visuminės saulės praleisties faktorius, %;  
 $GE$  – geometrinis efektyvumas;  
 $LT$  – šviesos praleisties faktorius, %;  
 $PE$  – pirminė energija;  
 $U$  – pastato atitvaros šilumos perdavimo koeficientas,  $W/m^2 \cdot K$ ;  
 $V$  – tūris,  $m^3$ .

## Santrumpos

$A_p$  – apribojimai (angl. *Constraints*);  
AHP – analitinio hierarchinio proceso metodas (angl. *Analytical Hierarchy Process*);  
AP – aksiomatinis projektavimas (angl. *Axiomatic Design*);  
BIM – Informacinis statinio modeliavimas (angl. *Building Information Modeling*);  
BP – bendrieji poreikiai (angl. *General needs*);  
BREEAM – tarptautinė tvarių pastatų vertinimo sistema (angl. *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*);  
COPRAS – kompleksinio proporcingo vertinimo metodas (angl. *Complex Proportional Assessment of Alternatives*);  
DB – energinio modeliavimo įrankis DesignBuilder;  
DP – dizaino (projektiniai) parametrai (angl. *Design parameters*);  
ES – Europos Sąjunga;  
FR – funkciniai reikalavimai (angl. *Functional requirements*);  
GCA – gyvavimo ciklo analizė (angl. *LCA – Life Cycle Analysis*);  
IFC – pagrindinės pramonės klasės (angl. *Industry Foundation Classes*);  
IPP – integruotas pastato projektavimas (angl. *Integrated Building Design*);  
KFI – kokybės funkcijos išskleidimo metodas (angl. *QFD – Quality Function Deployment*);  
LED – šviesą skleidžiantis diodas (angl. *Light-Emitting Diode*);  
LEED – žaliųjų pastatų vertinimo sistema (angl. *Leadership in Energy and Environmental Design*);  
LOD – sukurto modelio informacijos detalumo lygis ir talpinama informacija (angl. *Level of Development*);  
MADM – daigiatikslis sprendimo priėmimas (angl. *Multi-Objective Decision Making*);  
MODM – daugiaobjektis sprendimo priėmimas (angl. *Multi-Attribute Decision Making*);  
nFR – nefunkciniai reikalavimai (angl. *Non-functional requirements*);  
ŠVOK – šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemos (angl. *heating, ventilation and air conditioning, HVAC*);  
TR – techniniai reikalavimai (angl. *technical requirements*).



## Sąvokos

*Pastato koncepcija* – tai pradinė statinio vizija, apibrėžianti pagrindinius sprendinius tolesniam detaliajam projektavimui.

*Modeliavimas* (angl. Modeling) – tai objekto modelio kūrimas, siekiant sukurti norimą rezultatą.

*Technologija* – tai proceso atlikimo būdų ir priemonių visuma.

*Integruotas pastato projektavimas* – tai projektavimo procesas, kurio metu jau ankstyvojoje projektavimo stadijoje įtraukiami visi projekto dalyviai ir optimizuojami galimi sprendiniai siekiant visoms grupėms palankiausio sprendinio.

*Funkcionalumas* – tai savybė, nusakanti kaip gerai atitinka tam tikrą paskirtį ar tikslą.

*Mažaenerginiai pastatai* – tai aukšto energinio efektyvumo pastatai, suvartojantys nedaug energijos, kurių dalį sudaro ir atsinaujanti energija.

*Pasyviosios energinio projektavimo strategijos* – pastato architektūriniai-konstruktiniai sprendiniai, apimantys šiluminę izoliavimą, mažus šilumos perdavimo koeficientus ir visuminės saulės praleisties faktorius, mažus įstiklinimo plotus, apsaugos nuo saulės priemonės, sandarumą, kompaktiškumą.

*Pastato energinis naudingumas* – išmatuotas arba apskaičiuotas energijos kiekis, reikalingas patenkinti pastato poreikius šildymui, vėdinimui, vėsinimui, karštam vandeniui ir apšvietimui.

*Pirminė energija* – nekonvertuota ir netransformuota atsinaujinančių ir neatsinaujinančių išteklių energija.

*Pastato techninės sistemos* – tai pastato šildymo, vėdinimo, vėsinimo, karšto vandens ir apšvietimo įranga.



---

# Turinys

IVADAS .....	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas .....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai .....	3
Tyrimų metodika.....	3
Darbo mokslinis naujumas .....	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	4
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
 1. PASTATO IR JO ENERGINIO FUNKCIONALUMO PROJEKTAVIMO YPATYBIŲ IR METODŲ APŽVALGA .....	 7
1.1. Tvarių ir energiška efektyvių pastatų aktualumas .....	7
1.2. Tvarių ir energiška efektyvių pastatų sertifikavimas.....	8
1.3. Energiškai efektyvių ir tvarių pastatų projektavimas .....	12
1.3.1. Integruotas pastato projektavimas.....	13
1.3.2. Tradicinio ir integruoto pastato projektavimo ypatumai.....	18
1.3.3. Inžineriniai projektavimo metodai .....	20
1.3.4. Daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai .....	22

1.3.5. Modeliavimo ir analizės įrankių vaidmuo pastato projektavime .....	26
1.3.6. Informacinio statinio modeliavimo ypatumai ir reikšmė naujų pastatų projektavimui .....	26
1.4. Pasyvios energinio projektavimo strategijos ir sprendiniai .....	42
1.4.1. Pastato forma, kompaktiškumas ir orientacija .....	26
1.4.2. Pastato įstiklinimo plotas ir geometrija .....	26
1.4.3. Langų šiluminės optinės savybės .....	26
1.4.4. Apsaugos nuo saulės priemonės .....	26
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	42
<b>2. SIŪLOMA PASTATO KONCEPCIJOS RENGIMO TECHNOLOGIJA .....</b>	<b>45</b>
2.1. Pastato projektavimo trukdžių identifikavimas .....	45
2.2. Pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmas.....	48
2.1.1. Kokybės funkcijos išskleidimo metodas .....	52
2.2.2. Aksiomatinio projektavimo metodas .....	56
2.2.3. Modifikuotas kokybės funkcijos išskleidimo namo metodas.....	63
2.2.4. Siūlomų naudoti energinio modeliavimo ir projektavimo programų sąsajų formatai .....	63
2.2.5. Daugiakriteris sprendimų priėmimo metodas COPRAS.....	65
2.3. Antrojo skyriaus išvados ir uždaviniai .....	66
<b>3. SIŪLOMOS PASTATO KONCEPCIJOS RENGIMO TECHNOLOGIJOS TAIKYMAS ENERGETINIO FUNKCIONALUMO VERTINIMUI.....</b>	<b>69</b>
3.1. Siūlomos pastato koncepcijos rengimo technologijos taikymo atvejis.....	70
3.1.1. Pradinių duomenų analizė.....	70
3.1.2. Pastatui keliamų reikalavimų identifikavimas taikant kokybės funkcijos išskleidimo namo metodą.....	70
3.1.3. Funkcinių reikalavimų ir dizaino parametrų hierarchijų sukūrimas, taikant aksiomatinio projektavimo metodą .....	78
3.1.4. Pastato koncepcijos projektavimas .....	83
3.1.5. Sprendinių tinkamumo nustatymas, taikant informacijos aksiomą .....	88
3.2. Pastato koncepcijos kūrimas tradicinio projektavimo metodu .....	88
3.3. Parengtų pastato koncepcijų palyginimas.....	91
3.4. Trečiojo skyriaus išvados .....	98
<b>BENDROSIOS IŠVADOS .....</b>	<b>99</b>
<b>LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....</b>	<b>101</b>
<b>AUTORĖS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....</b>	<b>113</b>
<b>SUMMARY IN ENGLISH.....</b>	<b>115</b>

PRIEDAI <sup>1</sup> .....	129
A priedas. Atliktų empirinių tyrimų integruoto pastato projektavimo tema rezultatai .....	130
B priedas. Funkcinių reikalavimų ir dizaino parametrų hierarchijų sudarymo rezultatai .....	138
C priedas. Funkcinių ir dizaino parametrų ryšių nustatymo rezultatai .....	146
D priedas. Sąžiningumo deklaracija .....	154
E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje .....	155
F priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos .....	163

---

<sup>1</sup> Priedai pateikiami pridėtoje elektroninėje laikmenoje.



---

# Contents

INTRODUCTION .....	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis .....	2
The object of research .....	2
The aim of the thesis .....	3
The objectives of the thesis .....	3
Research methodology .....	3
Scientific novelty of the thesis .....	4
Practical value of the research findings.....	4
The defended statments.....	5
Approval of the research findings .....	5
The structure of the dissertation .....	6
 1. OVERVIEW OF THE CHARACTERISTICS AND METHODS OF THE DESIGN OF BUILDING AND ITS ENERGY FUNCTIONALITY .....	 7
1.1. Relevance of sustainable and energy efficient buildings.....	7
1.2. The certification of sustainable and energy efficient buildings.....	8
1.3. The design of sustainable and energy efficient buildings.....	12
1.3.1. Integrated building design.....	13
1.3.2. The features of traditional and Integrated building designs .....	18
1.3.3. Engineering design methods .....	20
1.3.4. Multicriteria decision making methods.....	22

1.3.5. The role of modeling and analysis tools in building design.....	26
1.3.6. The features of Building Information Modeling and its significance for the design of new buildings.....	29
1.4. Passive energy design strategies and solutions.....	33
1.4.1. Building form, compactness and orientation.....	34
1.4.2. Building glazing area and geometry .....	36
1.4.3. Thermal optical properties of the window .....	38
1.4.4. Shading devices .....	40
1.5. Conclusions of the first chapter and formulation of the dissertation tasks .....	42
2. THE SUGGESTED TECHNOLOGY OF CONCEPT BUILDING DESIGN .....	45
2.1. Identification of building design interference .....	45
2.2. The search algorithm of sustainable building solution.....	48
2.1.1. The method of Quality function deployment .....	52
2.2.2. The method of Axiomatic design.....	56
2.2.3. Modified House of Quality function deployment.....	63
2.2.4. The interface formats for proposed energy modeling and design programs .....	63
2.2.5. Multicriteria decision making method COPRAS.....	64
2.3. Conclusions of the second chapter .....	66
3. APPLICATION OF THE TECHNOLOGY OF CONCEPT BUILDING DESIGN FOR THE ASSESSMENT OF BUILDING ENERGY FUNCTIONALITY.....	69
3.1. Case study: application of the technology of concept building design.....	70
3.1.1. The analysis of the initial data .....	70
3.1.2. The identification of the main requirements for the building using the method of Quality function deployment .....	70
3.1.3. Hierarchy composition of functional requirements and design parameters using Axiomatic design .....	78
3.1.4. The concept building design .....	83
3.1.5. Determination of suitability of the alternative using Information Axiom .....	88
3.2. Building concept design using traditional building design process.....	88
3.3. Comparison of the developed building concepts.....	91
3.4. Conclusions of the third chapter.....	98
GENERAL CONCLUSIONS .....	99
REFERENCES .....	101
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	113
SUMMARY IN ENGLISH.....	115



ANNEXES <sup>2</sup> .....	129
Annex A. The empirical research results on the Integrated Building Design .....	130
Annex B. The results of hierarchy composition of functional requirements and design parameters .....	138
Annex C. The results of determination of the relation between functional requirements and design parameters.....	146
Annex D. Declaration of academic integrity .....	154
Annex E. The co-author's agreements to provide published material in the doctoral dissertation .....	155
Annex F. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation .....	163

---

<sup>2</sup> The annexes are supplied in the enclosed compact disc.



---

# Ivadas

## Problemos formulavimas

Europos Sąjungos (toliau – ES) politiniai tikslai lemia naujus prioritetus statybos sektoriuje, skatina tvarų ir optimizuotą projektavimo, statybos procesą.

Šiuolaikinės projektavimo, modeliavimo ir analizės priemonės skverbiasi į statybos/projektavimo rinką, todėl keičia tradicinį projektavimo procesą ir lemia nuolatinę naujų, kruopščiau parengtų sprendinių paiešką. Dėl griežtėjančių ES reikalavimų, didėjančių projekto apimčių, dalyvių skaičiaus ir technologinės kaitos projektavimo procesas tampa sudėtingesnis. Optimizavimo ir sprendimo priėmimo procesas projektuotojams tampa iššūkiu, nes sprendinius tenka vertinti pagal daugybę tarpusavyje sunkiai derinamų kriterijų: energinis naudingumas, poveikis aplinkai, vidaus mikroklimato parametrai, kaina ir t. t.

O tradiciniame projektavimo procese architektūriniai – konstrukciniai sprendiniai buvo ir dažnai dar būna priimami vienpusiškai siekiant estetinio vaizdo. Galimos pastato alternatyvos keičiamos intuityviai – remiantis tik architekto patirtimi. Tai lemia, kad techninės sistemos turi būti pritaikytos prie jau priimtų architektūrinių sprendinių taip didinant inžinerinių sistemų galias, investicijas ir lemiant iš esmės neefektyvų projektavimo procesą. Šis neužtikrina užsakovo lūkesčių ir pagrindinių reikalavimų.

Disertacijoje numatoma sukurti pastato koncepcijos rengimo technologiją, kuri ženkliai sumažintų mokslinių tyrimų apžvalgoje nustatytus ir empiriniu tyrimu patvirtintus tradicinio pastato projektavimo metodo trūkumus bei užtikrintų pradinį reikalavimus atitinkantį sprendinį.

## Darbo aktualumas

Europos Komisija (toliau – EK) pabrėžia, kad energijos švaistymo mažinimas ir energijos vartojimo efektyvumo didinimas yra strateginis prioritetas ES. Taip siekiama spręsti ne tik klimato kaitos, aplinkosauginius klausimus, tačiau ir mažinti energetinę priklausomybę.

Pastatų sektorius suvartoja daugiau kaip 40 % ES galutinės energijos ir sąlygoja 35 % viso CO<sub>2</sub> išsiskyrimo. Europos Parlamentas pripažino, kad pastatų sektorius turi būti pagrindinis elementas ES plane siekiant iki 2050 metų 80 % sumažinti energijos suvartojimą lyginant su 2010 m. Remiantis tuo, ES buvo įsipareigojusi jau iki 2020 m. energijos vartojimą sumažinti 20 %. Tai reiškia nacionaliniu lygmeniu keliamus kasmet griežtesnius reikalavimus naujai statomiems ar atnaujinamiems pastatams bei iš esmės kitokį projektavimo ir statybos procesą.

Moksliniuose tyrimuose nustatyta ir empiriniame tyrime patvirtinta, kad tradicinis projektavimo procesas tampa nebeefektyvus ir vis sunkiau gali įvykdyti užsibrėžtus reikalavimus, tuo tarpu integruotas pastato projektavimas (toliau – IPP) yra gana sudėtingas, daugialypis ir bent kol kas nuolatinio tobulinimo reikalaujantis procesas.

Darbe pristatoma pastato koncepcijos rengimo technologija, kuri IPP procese integruoja bendrojoje inžinerijoje žinomus – kokybės funkcijos išskleidimo (toliau KFI) ir aksiomatinio projektavimo (toliau AP) – metodus. Dėl savo išskirtinių savybių jie leidžia jau pirmuosiuose projekto etapuose sutelkti IPP komandą, išgryninti tiek užsakovo, tiek komandos reikalavimus, anksti suformuluoti techninius rodiklius, jų tarpusavio koreliaciją. Tokiu būdu užtikrinamas pirminius reikalavimus atitinkantis galutinis sprendinys.

## Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – pastato koncepcijos rengimo procesas integruotame pastato projektavime.

## Darbo tikslas

Sudaryti pastato koncepcijos rengimo procedūrų seką, kurioje taikomi metodai ir priemonės leistų efektyviau rasti projekto užsakovo pirminius reikalavimus ir projektavimo komandos kompetencijas suderinantį, energiškai funkcionalų pastato koncepcijos projektinį sprendinį.

## Darbo uždaviniai

Tam, kad būtų pasiektas darbo tikslas, sprendžiami šie uždaviniai:

1. Įvertinti tvarių pastatų projektavimo jų energinio funkcionalumo sprendinių bei integruoto pastato projektavimo principų taikymo reikšmę.
2. Nustatyti metodus, vertinančius ir derinančius vartotojo poreikius, formalius reikalavimus ir sprendimų teikėjo kompetencijas. Įvertinti šių metodų integravimo į pastato projektavimo procesą galimybes.
3. Sudaryti pastato darnaus sprendinio paieškos detalizuotą procedūrų seką, pritaikant ir integruojant pasirinktus metodus bei įrankius pastatų projektavimui, modeliavimui bei vartotojo lūkesčių ir projektavimo komandos gebėjimų suderinimui.
4. Patikrinti sukurto pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmo veiksmingumą energiškai funkcionaliam sprendiniui gauti. Gautus rezultatus palyginti su tradicinio projektavimo metu gautu sprendiniu.

## Tyrimų metodika

Siekiant iškelti ir išgryninti darbo problematiką darbe atlikta mokslinių šaltinių analizė, sisteminimas, lyginimas ir apibendrinimas. Darbe buvo remtasi tiek kiekybiniais, tiek kokybiniais tyrimų metodais. Taikytas empirinio tyrimo metodas – apklausa, leido patvirtinti literatūroje aptariamus tradicinio pastato projektavimo trūkumus.

Remiantis sintezės metodu darbe integruoti kitose inžinerijos srityse žinomi kokybės funkcijos išskleidimo bei aksiomatinio projektavimo metodai, taip pat į sukurta technologiją įtrauktas daugiakriteris sprendimų priėmimo metodas COPRAS bei pastato gyvavimo ciklo analizė.

Siekiant pademonstruoti technologijos veiksnumą, buvo taikoma atvejo ir sisteminė analizė, gautų skaičiavimo rezultatų palyginimas, interpretavimas ir grafinis duomenų vaizdavimas.

Pastato skaitmeninio architektūrinio modelio kūrimui ir energiniam modeliavimui pasitelktos Revit ir DesignBuilder priemonės.

## **Darbo mokslinis naujumas**

Rengiant disertaciją, buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Šiame darbe pristatyta autorės sukurta pastato koncepcijos rengimo technologija, kuri pirmą kartą apjungia kitose inžinerijos srityse naudojamus metodus – kokybės funkcijos išskleidimo (KFI) ir aksiomatinio projektavimo (AP) metodus, taip pat šiuolaikines modeliavimo ir projektavimo priemones.
2. Autorės parengtoje technologijoje integruoti KFI ir AP kartu ar atskirai dar retai taikomi pastato kūrimo procese ir iki šiol nebuvo panaudoti integruoto pastato projektavimo (IPP) procese. Dėl šių metodų savybių sukuriamas IPP palankių procedūrų ir priemonių derinys, žymiai sumažinantis pagrindinius tradicinio projektavimo trūkumus.
3. KFI ir AP integravimas padeda išgryninti ir suderinti projekto prioritetus, sudaryti hierarchines funkcinių reikalavimų ir projektinių parametų sistemas, leidžiančias greičiau ir efektyviau sukurti į pirminius reikalavimus orientotą sprendinį.
4. Sukurtos technologijos procedūros yra universlios, t. y. pasirinkus atitinkamus projektavimo ir modeliavimo įrankius, KFI ir AP metodų pagrindu gali būti sprendžiami ne tik energinio funkcionalumo, bet ir kiti pastato koncepcijos rengimo aspektai (poveikio aplinkai, ekonomiško ir kt.).

## **Darbo rezultatų praktinė reikšmė**

Pristatoma technologija sukuria sklandesnį pastato kūrimo procesą, kai siekiant pastato, jį jungiančių sistemų visumos tvarumo detalčiau nustatomi ir suderinami projekto dalyvių reikalavimai.

Kartu naudojamos skaitmeninio projektavimo ir modeliavimo priemonės užtikrina produktyvų ir kiekybiniais parametrais kontroliuojamą integruoto pastato

projektavimo procesą ankstyvojoje jo stadijoje. Kartu tai galėtų tapti postūmiu dirbtiniam intelektui įsijungti į pastatų kūrimą.

## Ginamieji teiginiai

1. Efektyvesniam IPP principų taikymui pastato informaciniame modeliavime, energinio funkcionalumo sprendinių paieškai reikalingos labiau algoritmizuotos procedūros, jas formalizuojantys metodai.
2. Vartotojo lūkesčiams/reikalavimams projektavime nustatyti, derinti ir juos atitinkantiems inžineriniams sprendiniams paruošti efektyviu laikomas kokybės funkcijos išskleidimo (KFI) ir aksiomatinio projektavimo (AP) metodų derinys.
3. KFI ir AP metodų struktūrizavimo ir formalizavimo lygis leidžia pritaikyti juos statinių projektavimo tikslams, pasiekti pastato informaciniam modeliavimui (BIM technologijai) priimtina algoritmizavimo lygį.

## Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbti 8 moksliniai straipsniai: vienas – Clarivate Analytics Web of Science duomenų bazėse referuojamame leidinyje, turinčiame citavimo rodiklį, 3 – tarptautinių konferencijų leidiniuose, referuojamuose Clarivate Analytics duomenų bazėje Proceedings (Lapinskienė *et al.* 2014; Valančius ir Lapinskienė 2014; Lapinskienė, Martinaitis 2013). 2 – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Lapinskienė ir Martinaitis 2017; Džiugaitė-Tumėnienė ir Lapinskienė 2014). 2 – konferencijų pranešimų medžiagoje (Lapinskienė *et al.* 2017; Lapinskienė *et al.* 2013).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Tarptautinėje konferencijoje „*Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции*“ 2013 m. Maskvoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Modern Building Materials, Structures and Techniques*“ 2013 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2014 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2017 m. Vilniuje.

## **Disertacijos struktūra**

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra šeši priedai.

Darbo apimtis yra 129 puslapiai, neskaitant priedų. Tekste panaudota 10 numeruotų formulių, 38 paveikslai ir 19 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 150 literatūros šaltinių.



---

## Pastato ir jo energinio funkcionalumo projektavimo ypatybių ir metodų apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiamas tradicinis bei integruotas pastato projektavimas, projektavimo modeliavimo ir analizės priemonės akcentuojant energinius aspektus.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autorės straipsniai: Lapinskienė *et al.* 2014; Valančius ir Lapinskienė 2014; Džiugaitė-Tumėnienė ir Lapinskienė 2014; Motuzienė *et al.* 2016).

### 1.1. Tvarių ir energiškai efektyvių pastatų aktualumas

Pastatų tvarumas – tai itin svarbus aspektas pasauliniu, Europos Sąjungos (ES) ir vietiniu mastu statybų ir aplinkos apsaugos srityse (Krizmane *et al.* 2016). Mažai anglies dioksido išskiriančių technologijų ekonomikos spartinimas, perėjimas prie žiedinės ekonomikos – esminis mūsų laikų iššūkis bei pagrindinis politinis ES prioritetas. Pasinaudojusi nauju impulsu, kurį suteikė COP21 Paryžiaus susitarimas, Europos Komisija savo ambicingą energijos ir klimato politiką parėmė *Clean Energy For All Europeans* paketu, kurį priėmė 2016 m. lapkritį. Šiuo išsamiu teisės aktų

projektų rinkiniu siekiama trijų bendrų tikslų: (a) energetinio efektyvumo, (b) paversti Europą atsinaujinančių energijos šaltinių lydere ir (c) sąžiningų sąlygų vartotojams. Čia moksliniai tyrimai ir inovacijos atlieka svarbų vaidmenį greitinant perėjimą prie mažai anglies dioksido išskiriančių technologijų ekonomikos (HORIZON 2020).

Valdžios institucijoms pastatų sertifikavimas leidžia pasiekti nacionalinius energijos tikslus ir pagerinti pastatų sektoriaus tvarumą aplinkos, socialiniu ir ekonominiu atžvilgiu. Dažnai sertifikavimas labiausiai pasiteisina, kai greta taikomos kitos energijos vartojimo efektyvumą skatinančios iniciatyvos (IEA Energy performance certification). Energinio efektyvumo klasės gavimas reiškia, kad pasiekta energijos kokybė, leidžianti sumažinti apšvietimo, šildymo ir vėsinimo, išskiriamo CO<sub>2</sub> kiekį nesumažinant komforto (Zhang *et al.* 2018). Be to apima ir tam tikrus socialinius interesus – didesnę visuomenės informuotumą energijos ir aplinkosaugos problemų atžvilgiu, mažesnes išlaidas vartotojams, tikslesnius duomenis apie pastatus, kuriais gali būti remiamasi vystant politiką ateityje, siekiant toliau gerinti pastatų energinį efektyvumą (Oka *et al.* 2001).

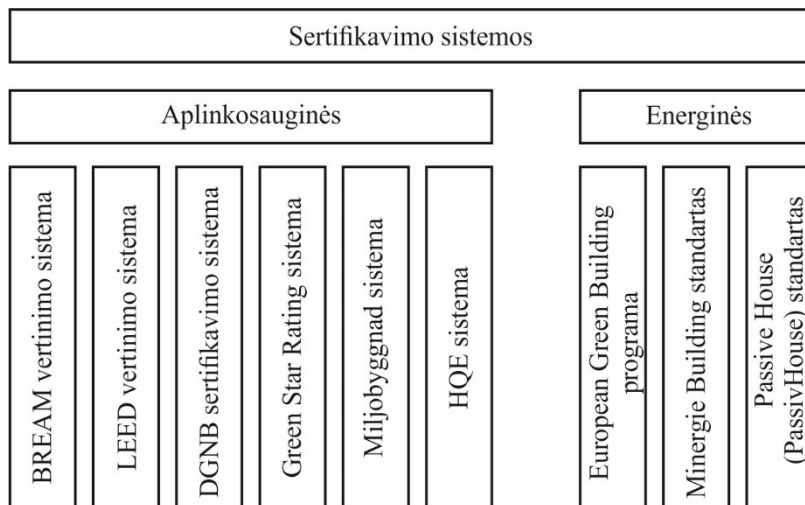
Dėl šių priežasčių iš esmės sugriežtėjo reikalavimai pastatams, pasikeitė pats projektavimo procesas ir atsirado poreikis energiškai efektyvių pastatų klasifikacijai.

Pasaulyje yra nemažai mažaenergetinių pastatų koncepcijų ir jų vertinimo sistemų: BREEAM, LEED, DGNB, Green Star, Miljobyggnad, HQE, Green Building, Minergie, Passive Buildings ir t. t. Šios skirstomos į dvi grupes: orientuotos į tvarumo arba energinį kriterijų.

## 1.2. Tvarių ir energiškai efektyvių pastatų sertifikavimas

Tam, kad būtų sukurtas iš tiesų tvarus pastatas, visuose pastato vystymo etapuose reikalinga taikyti kompleksines priemones estetikos (pastatų technologijos ir forma), funkcionalumo (dabartinis funkcionalumas ir gebėjimas prisitaikyti prie poreikių ateityje) bei statybos (naudojamos medžiagos) atžvilgiu. Kad šios priemonės būtų sėkmingai įgyvendintos, naudojami statybos kodeksai, standartai, sertifikavimo sistemos. Tarptautiniai vertinimo įrankiai, pavyzdžiui, LEED, BREEAM, žaliųjų pastatų, pasyvių namų standartas, beveik nulinės energijos pastatų standartas ir kiti yra padarę didžiulį poveikį statybų pramonei ir pagelbėję identifikuoti tvarių pastatų vystymo komercinį pagrindą. Vadinasi, tvarumo vertinimas nacionaliniu lygiu turi būti plėtojamas vertinant sistemas, kurios yra stabilios ir pakankamai išvystytos tarptautiniu lygiu, be to, turi būti atsižvelgiama į pokyčius laikui bėgant (Krizmane *et al.* 2016).

Pastatų sertifikavimo sistemos skirstomos į dvi grupes: aplinkosauginės ir energinės (1.1 pav.).



**1.1 pav.** Pastatų sertifikavimo sistemos ir jų skirstymas  
(sudaryta autorės pagal (Heincke *et al.* 2014))

**Fig. 1.1.** Building labeling systems (Heincke *et al.* 2014)

Tvarumo ir poveikio aplinkai vertinimo įrankiais siekiama sumažinti pastatų suvartojamą energijos kiekį ir padidinti resursų naudojimo efektyvumą, sumažinti aplinkos taršą, paskatinti taikyti inovatyvius sprendimus ir technologijas statant ir naudojant pastatus.

1.1 paveiksle pateiktos populiariausios pasaulyje egzistuojančios pastatų sertifikavimo schemas. Pagrindinėmis aplinkosauginėmis schemomis išskiriamos BREAM, LEED, DGNB, Green Star Rating, Miljøbyggnad, HQE sistemos. Dažniausiai taikomos energinės sistemos išskiriamos: European Green Building, Minergie Building Standart, Passive House (PassivHouse) Standart. Pagrindinis šių sistemų skirtumas yra kriterijus, kuriam skiriamas didžiausias dėmesys, t. y. didinti energinį efektyvumą ar tvarumo kriterijams.

1.1 lentėje pateiktos sertifikavimo sistemų vertinimas pagal pagrindinius kriterijus ir subkriterijus.

1.1 lentelėje pristatyti skirtingi kriterijai ir jiems skiriamas sertifikavimo sistemų vertinimas. Kriterijai apima tiek energinio naudingumo vertinimą, tiek tvarumo, ekonominius, socialinius ir kitus kriterijus. Pvz.: LEED ir BREAM yra vienos populiariausių ir plačiausiai naudojamų sistemų, tačiau jų energinio

naudingumo vertinimas iš principo skiriasi – LEED sistemoje jis vertinamas (32 %), o BREAM skiria žemiausią vertinimą – (17 %).

**1.1 lentelė.** Pastatų sertifikavimo sistemų vertinimas (Heincke *et al.* 2014)

**Table 1.1.** The rating of building energy labeling systems (Heincke *et al.* 2014)

Kriterijus	Subkriterijus	Sertifikavimo sistemų vertinimas
1	2	3
Energija	Energinis naudingumas	BREEAM (17 %); LEED (32 %); DGNB (5 %); Green Star (22 %); Miljobyggnad (27 %); HQE (18 %)
	Energijos sąnaudos (šildymas/vėdinimas)	
	Energijos tipas (aplinkosauginis aspektas)	
Mikroklimatas	Oro kokybė	BREEAM (13 %); LEED (14 %); DGNB (14 %); Green Star (18 %); Miljobyggnad (53 %); HQE (38 %)
	Šiluminis komfortas	
	Natūralus apšvietimas	
	Dirbtinis apšvietimas	
	Qakustinis komfortas/triukšmas	
Vanduo	Naudojimas	BREEAM (6 %); LEED (9 %); DGNB (1 %); Green Star (6 %); Miljobyggnad (6 %); HQE (11 %)
	Kokybė	
	Perdirbimas/panaudojimas	
	Lietaus vanduo	
Medžiagos	Perdirbimas	BREEAM (11 %); LEED (13 %); DGNB (1 %); Green Star (8 %); Miobyggnad (13 %); HQE (4 %)
	Aplinkosauginiai aspektai	
	Kilmė	
Atliekos	Atliekų tvarkymas	BREEAM (7 %); LEED (kitas vertinimas); DGNB (4 %); Green Star (2 %); Miljobyggnad (–); HQE (3 %)
Aplinka	Vietos pasirinkimas	BREEAM (13 %); LEED (13 %); DGNB (10 %); Green Star (10 %); Miljobyggnad (–); HQE (4 %)
	Šviesos tarša	
	Triukšmas	
	Ekologija	
	Karščio salos efektas	

1.1 lentelės pabaiga

1	2	3
Statybos etapas	Bendras statybos efektas	BREEAM (4 %); LEED (kitas vertinimas); DGNB (1 %); Green Star (–); Miljobyggnad (–); HQE (1 %)
Transportas	Susisiekimas	BREEAM (7 %); LEED (11 %); DGNB (2 %); Green Star (10 %); Miljobyggnad (–); HQE (2 %)
	Pėsčiųjų ir dviračių prieiga	
Ekonomika	Gyvavimo ciklo išlaidos	BREEAM (2 %); LEED (kitas vertinimas); DGNB (20 %); Green Star (–); Miljobyggnad (–); HQE (–)
Inovacijos	Inovacijos, naujos technologijos	BREEAM (9 %); LEED (5 %); DGNB (–); Green Star (5 %); Miljobyggnad (–); HQE (–)
Kita	Saugumas	
	Teršalai	
	Igyvendinimas	
	Estetika	
	Išsiskyrimai/emisijos	
	Išpildymas	
	Valdymas/priežiūra	

BREEAM yra pirmoji poveikio aplinkai vertinimo sistema pasaulyje, kuria remiantis įvertinta apie 560 000 pastatų, tačiau LEED laikomas lankstesniu įrankiu ir yra naudojamas 160 šalių ir teritorijų. Be to, nuo 1998 m. įvertinus aštuonis pagrindinius šiam tyrimui naudotus mokslinius žurnalus, lyginant su BREEAM, LEED analizuojančių straipsnių yra kur kas daugiau. Su CASBEE ir Green Star NZ susijusių mokslinių straipsnių skaičius yra mažas (Doan *et al.* 2017). Silpniausia sistema gali būti laikoma Green Star NZ, nes ji orientuojasi tik į vieną tvarumo ramstį – poveikį aplinkai (Doan *et al.* 2017).

Viena pagrindinių priežasčių, dėl kurių kritikuojamos tokios sertifikavimo sistemos kaip LEED ar BREEAM, yra jų taškais paremtos sistemos. Visi LEED ir BREEAM kriterijai yra svarbūs, tačiau kai kuriais atvejais jie vertinami kaip

nevienodai reikšmingi. Dėl to atsiranda tendencija siekti taškų, skiriamų už paprastesnius kriterijus tam, kad būtų pasiektas didžiausias įmanomas įvertinimas, taip potencialiai išvengiant žemesnio įvertinimo už sudėtingesnius kriterijus. Dėl šios priežasties vertinimo taškais sistema sukelia konfliktus, kai mėginama integruoti nesuderinamas sistemas vien tam, kad būtų gauta taškų už skirtingas rodiklių kategorijas. Taškų vaikymasis taip pat stabdo inovacijas, nes akcentuojami tik kai kurie vertinimo rodikliai (Turk *et al.* 2018).

Pastatų poveikio aplinkai ar tvarumo vertinimas yra pasaulinė problema išsivysčiusiose ir besivystančiose šalyse. LEED schemos bendras taškų ir privalomų kreditų skaičius buvo padvigubintas ketvirtoje versijoje, lyginant su antra versija, be to, buvo pridėtos dvi naujos kategorijos. BREEAM laikoma stipriausia vertinimo sistema, kurioje nuodugniai vertinama poveikis aplinkai ir visuomenei bei atsižvelgiama į ekonomiką ir institucijas (Doan *et al.* 2017).

2017 m. Europos Komisija, glaudžiai bendradarbiaudama su kitomis suinteresuotomis grupėmis, sukūrė naują atviro kodo vertinimo sistemą *Level(s)*, kurios pagrindinis tikslas yra skatinti pastatų tvarumą. Akcentuojama, kad pastatų sektorius yra pagrindinis Europos Komisijos žiedinės ekonomikos politikos tikslas, t. y. atsinaujinanti ekonomika, kurioje mažinamas išteklių ir energijos suvartojimas, tad sistema *Level(s)* planuojama kaip žiedinės ekonomikos priemonė.

Galima daryti išvadą, kad taikant bet kurią pastatų sertifikavimo sistemą, pagrindinis tikslas yra vienas – įgyvendinti ES keliamus tikslus. Pasirenkamos skirtingos priemonės, iš esmės keičiasi projektavimo procesas, užsakovo požiūris ir keliami tikslai. Tai verčia ir projektuotojus skirti didesnę dėmesį pastato energiniam efektyvumui ir tvarumui.

### 1.3. Energiškai efektyvių ir tvarių pastatų projektavimas

Besikeičiančios inžinerinės technologijos, keliami energinio efektyvumo ir tvarumo reikalavimai, išaugusi projektų apimtis ir dalyvių skaičius lemia naujus prioritetus statybos sektoriuje, skatina integruotą pastato projektavimą ir tvarų statybos procesą.

Tačiau viena didžiausių energiškai efektyvių pastatų projektavimo kliūčių yra ta, kad pastatai iš principo yra sudėtingos sistemos. Tradicinis projektavimo metodas yra labai nuoseklus procesas, o griežtėjantys energiniai reikalavimai ir ambicingesni aplinkosauginiai tikslai verčia projektavimo komandą optimizuoti skirtingus kriterijus, kai daugelis jų prieštaraujantys (Cole, Valdebenito 2013; Østergård *et al.* 2016) vieni kitiems. Pastato architektūriniame lygmenyje – parametrai, labiausiai lemiantys energinį efektyvumą – susiję su pastato apvaskalu: naudojamos medžiagos, jų šiluminės charakteristikos, pastato forma, įstiklinimas

ir orientacija pasaulio šalių atžvilgiu. Dauguma, jei ne visi šie parametrai, turėtų būti nustatomi ir optimizuojami ankstyvojoje projektavimo stadijoje. Nors projektas ir priimami sprendiniai ankstyvojoje projektavimo stadijoje dar nėra iki galo aiškūs, tačiau lems visą pastato gyvavimo ciklą. Tad iš esmės, kuo labiau pažengęs pastato projektavimo procesas, tuo daugiau pastangų reikės pakeisti projekto parametrus ir sprendinius (Kiatake *et al.* 2017).

Hetherington *et al.* (2011) pabrėžia, kad projektuojant pastatus yra daug esminių espektų – ne tik energinis efektyvumas, tačiau ir maloni, jauki aplinka, kurioje daug laiko praleidžia žmogus. Taip pat negalima nustumti į šoną estetikos, funkcionalumo, ar modernumo kriterijų, nes iš esmės pastatų projektavimas yra meno ir mokslo derinys.

Kesik & End (2016) teigia, kad siekiant sukurti tikrai sėkmingą ir visapusišką projektą, reikia atsižvelgti ir subalansuoti tarpusavyje šiuos projektavimo tikslus:

- prieinamumas (statybinės konstrukcijos, aukščiai, pritaikyti neįgaliesiems);
- estetika (išorinė išvaizda);
- ekonominis efektyvumas (statybinių medžiagų pasirinkimas atsižvelgiant į numatomą biudžetą ir išlaidas per pastato gyvavimo ciklą);
- funkcionalumas (erdvių planavimas, sistemų veikimas);
- istorinis išsaugojimas (istoriniai objektai remiasi tokiomis strategijomis: išsaugojimo, atkūrimo, atstatymo ar rekonstravimo);
- produktyvumas (susijęs su patalpose būnančių žmonių fiziniu ir psichologiniu komfortu);
- saugumas (fizinė apsauga bei apsauga nuo stichinių nelaimių);
- tvarumas (statybinių medžiagų ir strategijų aplinkosauginiai aspektai).

Turrin (2011) pastebi, kad visgi dizaino/projektavimo procesas iš esmės toks pat, nepriklausomai, kokiam tikslui tai skirta, t. y. pastato, detalių, įrenginių ir pan. Architektūrinis projektavimas yra iteracinis/ciklinis, pasikartojantis procesas, kai architektas vis iš naujo analizuoja ir tobulina alternatyvius sprendinius (Hetherington *et al.* 2011; Mora *et al.* 2011).

Tad šiai dienai neišvengiamai po truputį pereinama iš tradicinio į integruotą pastato projektavimą, keičiasi projekto dalyviai, naudojami projektavimo ir modeliavimo įrankiai. Tai leidžia sumažinti tradicinio projektavimo trūkumus ir daugiau dėmesio skirti pradiniais projekto reikalavimams.

### 1.3.1. Integruotas pastato projektavimas

Integruotas pastato projektavimas (IPP) – tai projektavimo procesas, kurio metu jau ankstyvojoje projektavimo stadijoje įtraukiami visi projekto dalyviai ir optimizuojami galimi sprendiniai, siekiant efektyviausio ir visų interesus atitinkančio sprendinio.

IPP kildinamas iš 1993 m. Kanadoje vykdyto nedidelio demonstracinio projekto aukšto efektyvumo namų statybai C2000 (IISBE). Programos techniniai reikalavimai apėmė energinio efektyvumo, poveikio aplinkai vertinimą, komfortą patalpose, funkcionalumą ir kitus parametrus.

IPP nėra naujas procesas, tačiau apjungia gerai žinomus metodus ir priemones, įtraukia įvairius specialistus, kurių patirtis ir žinios naudojamos nuo pirmo iki galutinio pastato sukūrimo etapo. Integruoto projektavimo metodas reikalauja visas suinteresuotųjų šalių bendruomenės narius pažvelgti į projekto tikslus iš įvairių, platesnių perspektyvų (WBDG 2016).

Integruotas viso pastato projektavimas susideda iš dviejų dalių, kurių tarpusavio sąveika ir remiasi: integruotas projektavimo metodas ir integruota komanda. Čia sujungiamos visos pastato projektavime dalyvaujančios grupės: architektai, konstruktoriai ir užsakovai bei užtikrinama, kad įvairių specialistų žinios ir interesai būtų suderinti.

Pradiniuose statinio projektavimo etapuose priimti sprendimai turi įtakos pastato efektyvumui ir kainai per ateinančius 50–100 metų (1.2 pav.). Iki šiol pastato projektavime pagrindinis ir svarbiausias vaidmuo teko architektui. Šio priimti sprendimai pirmuosiuose projektavimo etapuose dažniausiai buvo nekeičiami, o pasekmės pastato energiniam efektyvumui buvo jaučiamos per visą pastato gyvavimo ciklą. Inžinerinių sistemų projektuotojai turėdavo tiesiog „pritaikyti“ inžinerines sistemas prie jau esamų architektūrinių sprendimų, kurie, jei būdami neefektyvūs, išdidindavo energijos šaltinių, įrangos galias ir būsimas energijos sąnaudas. (International Energy Agency Task 23, [IEA Task 23] 2003) apibrėžė sprendimų priėmimo efektyvumą skirtingais pastato gyvavimo ciklo etapais (1.2 pav.).



**1.2 pav.** Sprendimų priėmimo efektyvumas skirtingais pastato gyvavimo ciklo etapais (IEA SHC Task 23 2003)

**Fig. 1.2.** The efficiency of decisions made during building life cycle (IEA SHC Task 23 2003)



Visi architektūriniai sprendiniai, susiję su pastato apvaskalu, yra vienas pagrindinių elementų, lemiančių pastato energinį efektyvumą (Tzempelikos *et al.* 2007). Būtent šie sprendiniai turi būti nagrinėjami projektavimo pradžioje, ir nors parametrai dar būna nepatikimi, tačiau turi didžiulę įtaką pastato gyvavimo ciklui. Šiam vertinimui beveik visada pasitelkiamos įvairios modeliavimo priemonės.

1.2 paveikslas iliustruoja, kad bet kokios galimos sprendinių alternatyvos, jų optimizavimas ir pakeitimas turėtų būti atliekami ankstyvojoje projektavimo stadijoje, nes pereinant į tolesnius projekto etapus, įvairūs pakeitimai lems didesnes investicijas arba taps nebeįmanomi.

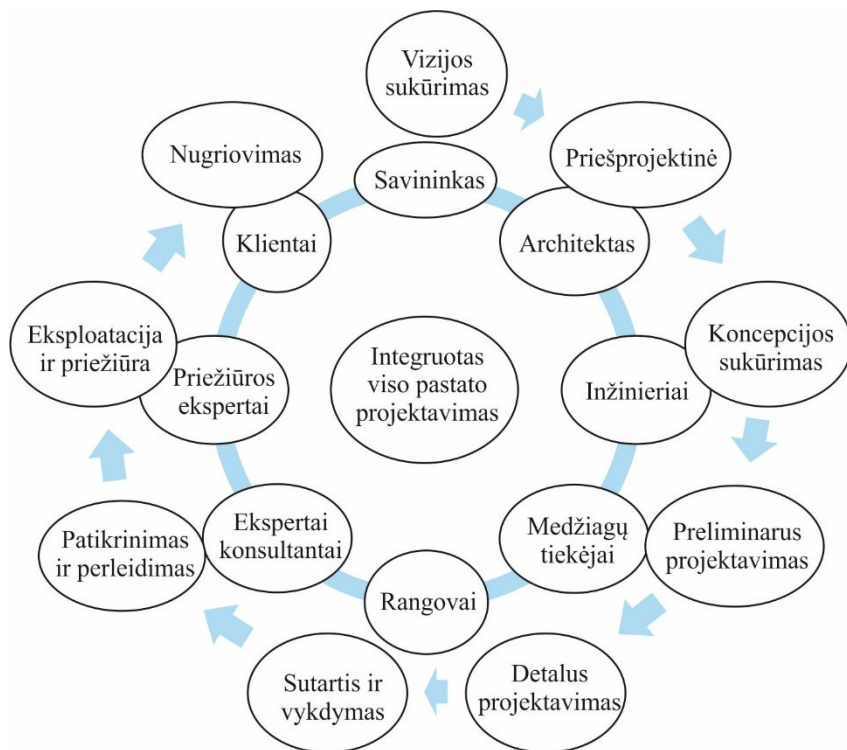
Literatūroje apžvalgoje Méndez Echenagucia *et al.* (2015), Wen & Hiyama (2016), Harmathy *et al.* (2016) daug dėmesio skyrė pastatų projektavimo procesui, akcentavo ankstyvosios projektavimo stadijos svarbą. Nemažai autorių siūlė įvairias metodikas koncepcinei/priešprojektinei projektavimo stadijai siekiant sumažinti įkūnytosios energijos poveikį aplinkai (Basbagill *et al.* 2013); pastato formos optimizavimui, siekiant sumažinti nepalankų vėją (Kim, Yi 2011), optimizuoti įstiklinimus, siekiant energinio efektyvumo ir vizualinio komforto (Ochoa *et al.* 2012), racionalizuoti statybinių mazgų pasirinkimą bandant sumažinti energijos poreikius per gyvavimo ciklą (Crawford *et al.* 2011). Analizuojami beveik nulinės energijos pastatai (Hernandez, Kenny 2010), mažaaenerginiai pastatų projektavimo ypatybės (Crawford *et al.* 2011; Hamdy *et al.* 2011; Sadineni *et al.* 2011).

1.3 paveiksle pavaizduotos dvi IPP dedamosios – IPP procesas ir IPP komanda. Šiuo atveju matyti, kad čia svarbus komandinis darbas, t. y. architektas nėra vienintelis asmuo, kuris priima sprendinius, nors ir išlaiko komandos vadovo pozicijas. Procesas leidžia suburti įvairių sričių specialistus – architektus, inžinierius, priežiūros specialistus ir pan. bei sukurti šių specialistų kompetencijų ir įgūdžių sinergiją visame procese. Užsakovas IPP procese taip pat turi kiek aktyvesnę poziciją nei tradiciniame projektavime. Taip užsitikrinama, kad nuo pat projekto pradžios bus atsižvelgiama į skirtingas interesų sritis.

Taip sukuriamas iteracinis procesas nuo koncepcijos parengimo iki detalaus projektavimo. Pasak Heiselberg (2007) IPP procesas apima šiuos etapus:

- Vizijos sukūrimas. Šis etapas apima projekto tikslų ir kriterijų nustatymą bei preliminaras galimybių studijas.
- Priešprojektinis etapas apima projekto konteksto analizę ir galimų strategijų planų sudarymą.
- Koncepcijos sukūrimas. Šio etapo metu kuriami įvairūs projektiniai koncepciniai sprendiniai ir vertinami pagal pradinius keliamus reikalavimus. Šio etapo rezultatas – integruota pastato koncepcija.

- Preliminarus projektavimas. Šiame etape pastato koncepcija vystosi į konkrečius architektūrinius ir techninius sprendinius, kurie yra skaičiuojami, koreguojami ir optimizuojami, kol pasiekiami projekto tikslai. Preliminaraus projektavimo metu sukuriamas naujas pastatas.



**1.3 pav.** Integruoto pastato projektavimo dedamosios  
(autorės sudaryta pagal (Larsson 2009))

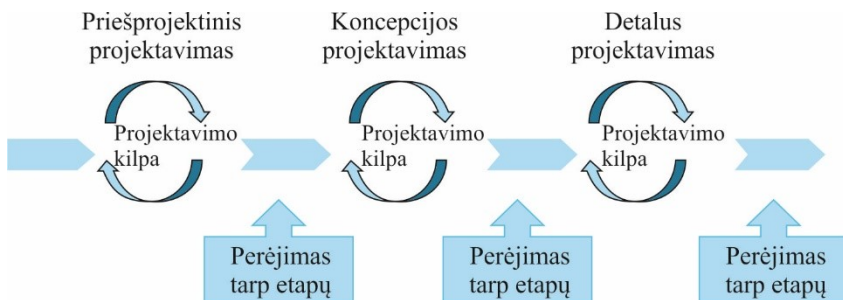
**Fig. 1.3.** The components of Integrated Building Design  
(composed by the author according (Larsson 2009))

- Detalus projektavimas. Šiame etape dar tobulinami techniniai sprendiniai, sukuriamą projekto dokumentacija, galutiniai brėžiniai ir specifikacijos, reikalingos bendradarbiauti su statybos bendrovėmis, medžiagų tiekėjais ir t. t. Taip parengiamas išsamus pastato projektas.
- Sutartis ir vykdymas apima pastato statybos kontrolę ir dalinį paleidimą. Rezultatas – turimas pastatas, atitinkantis keltus tikslus ir uždavinius.
- Patikrinimas ir perdavimas. Šiame etape pastatas dar karta patikrintas siekiant užtikrinti struktūrinių ir techninių sistemų veikimą bei perduodamas pastato savininkui.

- Eksploatacija ir priežiūra. Keliami energinio efektyvumo ir tvarumo reikalavimai lemia, kad reikalinga nuolatinė pastatų stebėseną, tinkamas valdymas ir priežiūra.
- Nugriovimas.

Ir nors išskiriami šie 9 etapai, tačiau mokslininkai savo darbuose dažniausiai nagrinėja atskirus IPP etapus išskirdami priešprojektinę, koncepcijos parengimo ir preliminarų projektavimo etapus (Heiselberg 2007; Luther *et al.* 2003).

IPP metu nagrinėjami ne tik architektūriniai-estetiniai, tačiau ir energinio efektyvumo, tvarumo, komforto aspektai, nagrinėjamos technologijos, įranga, tad labai svarbu, kad šiame procese bet kurio iteracinio etapo metu galimas grįžtamasis ryšys (1.4 pav.).



**1.4 pav.** Integruoto pastato projektavimo procesas (IEA Task 23 2003)

**Fig. 1.4.** The process of the Integrated Building Design (IEA Task 23 2003)

Šios iteracijos „kilpos“ reiškia projektavimo problemos alternatyvų analizę ir optimizavimą atsižvelgiant į specialistų skirtingas interesų grupes, apribojimus ir keliamus tikslus. Sprendinių alternatyvos gali būti suskaidytos, nagrinėjamos ir keičiamos tol, kol pasiekiamas norimas ir visoms grupėms priimtinas projektinis sprendinys.

Kadangi pastatų kūrimas, modeliavimas ir iteracijos užima nemažai laiko, modeliavimo programų naudojamas čia neišvengiamas (Eisenhower *et al.* 2012). Tai priemonės, kurios padeda suderinti architekto kūrybinį procesą nenukrypstant nuo užsibrėžtų siekių ir juos iš karto kompleksiskai įvertinti. Anksčiau modeliavimo programų naudojimas buvo komplikotas, tačiau dabar vis daugiau dėmesio skiriama programų sąsajų galimybėms, t. y. kuriami formatai, kompiuterinės kalbos, kurios leidžia bendradarbiauti programoms su minimaliu mechaniniu įsikišimu. Pvz., BIM ir energinio modeliavimo priemonių bendradarbiavimas. Bendrai tiek integruotas pastato projektavimas, tiek jo žingsniai ar kitos su pastato projektavimu susijusios problemos aptariamos ir literatūroje (Heiselberg 2007; Attia *et al.* 2012; Mora *et al.* 2011).

### 1.3.2. Tradicinio ir integruoto pastato projektavimo ypatumai

Pristatyti tradicinis ir integruotas pastato projektavimo procesai turi daug principinių skirtumų tiek savo dalyvių sudėtimi tiek pačiu procesu. 1.2 lentėje pateikti pagrindiniai šių dviejų projektavimo procesų skirtumai (Government of New Zealand 2008).

**1.2 lentelė.** Tradicinio ir integruoto Pastato Projektavimo proceso palyginimas (Government of New Zealand 2008)

**Table 1.2.** The comparison of the Integrated and Traditional Building Design process (Government of New Zealand 2008)

Tradicinis pastato projektavimas	Integruotas pastato projektavimas
Architektas parengia pirminį koncepcinį projektą	Visa komanda prisideda prie pradinio projekto
Tik pagrindiniai konsultantai dalyvauja sprendimų priėmimo procese	Visa komanda dalyvauja sprendimų priėmime
Laikas, pinigai ir energija minimizuojami pradinėje projektavimo stadijoje	Ankstyvas visos komandos įtraukimas padidina išlaidas pradinėje projektavimo stadijose
Galimas grįžtamasis ryšys tik koncepcinėje stadijoje	Galimas grįžtamasis ryšys viso proceso metu
Sistemos aptariamos ir projektuojamos atskirai	Holistinis mąstymas – kaip vieno bendro sprendinio
Sudėtingas optimizavimo procesas dėl nagrinėjamų sistemų atskyrimo	Paprastas, lengvas optimizavimo procesas
Sąveika/sinergija sunkiai nustatoma ir taikoma	Sąveika/sinergija lengvai nustatoma ir taikoma
Kapitalinės išlaidos laikomos kaip sąnaudos per visą gyvavimo ciklą	Išlaidos per visą gyvavimo ciklą vertinamos/įžvelgiamos plačiau
Procesas baigtas kartu su statybos užbaigimo procesu	Procesas vyksta naudojimo ir priežiūros metu, auditas, užimtumo vertinimas

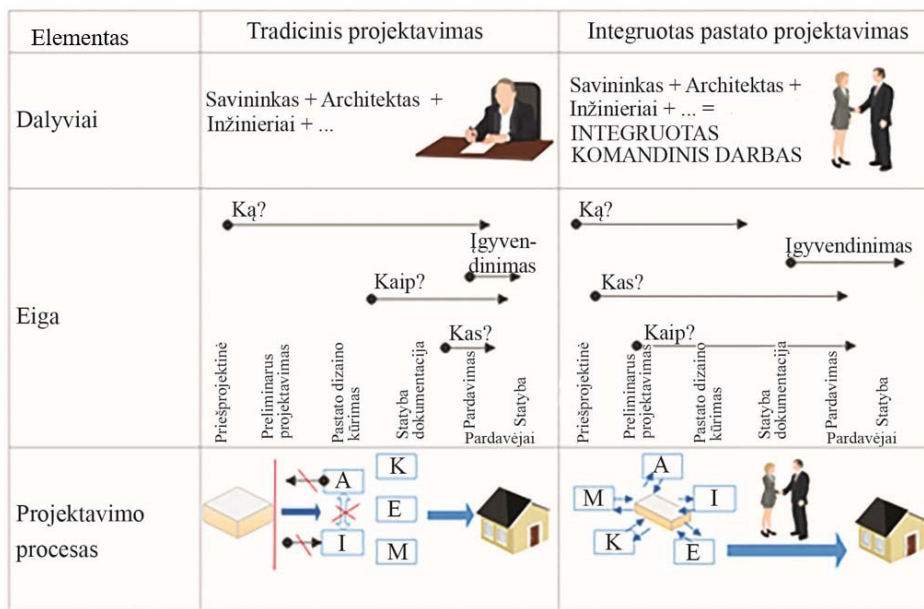
Esminis skirtumas tarp šių projektavimo procesų išryškėja dėl architekto vaidmens, komandos bendradarbiavimo bei požiūrių į pastatą kaip į kuriamą sistemą.

Tradicinis projektavimas yra linijinis procesas, kuriame architektas sukuria pirminę koncepciją, o inžinieriai dirba kaip atskiros žmonių grupės tarpusavyje bendradarbiaujantys minimaliai, tad optimizavimo procesas tampa komplikotas. Pastato sistemos projektuojamos kiekviena atskirai, o grįžtamasis ryšys galimas tik koncepcijos parengimo stadijoje. O integruotame pastato projektavime svarbiausia

ypatybė – visos projekto grupės dirba kartu, todėl ir pradinė koncepcija sukuriamą atsižvelgiant į bendrus interesus. Labai svarbus galimas grįžtamasis ryšys, kai pakeitimai galimi viso proceso metu, nes pastatas kuriamas holistiniu požiūriu.

Pasak Larsson (2009) nors tradicinis projektavimas atrodo pakankamai greitas ir paprastas, tačiau todėl labai dažnai gaunamos išdidintos pastato eksploatacijos išlaidos, tik vidutinis komfortas, o šie veiksniai žymiai sumažina ilgalaikę nuomos ir turto vertę. Kol tradicinio projektavimo procese nereikalaujama energinio modeliavimo priemonėmis numatyti būsimų pastato energijos sąnaudų ir eksploatacijos išlaidų, vėlesniuose etapuose tai tampa netikėtumu pastato savininkams ir naudotojams. Net jei projekto metu ir buvo pasiūlyti efektyvesni inžineriniai sprendiniai, tačiau inžinieriai būna įtraukti tik vėlesniuose etapuose – tai reiškia, kad bus smarkiai padidintos kapitalinės investicijos.

Kalbant apie architektų vaidmenį projektuojant pastatą, literatūroje pabrėžiama, kad daugelis architektų nežino/nenumano, kokia jų architektūrinių/konstruktinių sprendinių įtaka energiniam efektyvumui, komfortui. Šie tikslai paliekami vėlesniam optimizavimo procesui. Siekiant, kad pastatai prisidėtų prie darnaus vystymosi, reikalingos naujos metodikos, priemonės, kurios padėtų įtraukti energijos ir komforto analizę į ankstyvasias projektavimo stadijas (Bleil de Souza 2012).



**1.5 pav.** Tradicinio ir šiuolaikinio projektavimo palyginimas

(autorės sudaryta remiantis Heiselber (2007))

**Fig. 1.5.** The comparison of the Integrated and Traditional Building Design process  
(composed by author according Heiselberg (2007))

1.5 paveiksle pavaizduotas tradicinio ir integruoto pastato projektavimo palyginimas pagal dalyvius ir jų bendradarbiavimo strategiją, pastato kūrimo eigą ir projektavimo procesą. Be išvardytų skirtumų, 1.5 paveiksle matyti, kad ruošiant projektą, atsiranda didžiulis projektavimo priemonių skirtumas – IPP naudojamos įvairios modeliavimo priemonės, o pats projektas, dažniausiai ruošiamas BIM platformoje. Taip supaprastinamas visų dalyvaujančių grupių bendradarbiavimas ir projektavimo procesas tampa efektyvesnis.

Be to, tradiciniame projektavime dažnai kyla kitos problemos – architektūriniai sprendiniai dažnai būna orientuoti vienpusiškai, siekiant tik estetinio vaizdo, galimos architektūrinės variacijos keičiamos intuityviai, remiantis tik architekto patirtimi. Todėl išvardintos problemos lemia, kad techninės sistemos ir jų galios turi būti pritaikytos prie jau esamų architektūrinių sprendimų. Tai išdidina sistemų galias, investicijas ir lemia neefektyvumą. Kadangi pastatų projektavimas yra neatskiriamas nuo užsakovo reikalavimų, tai toks tradicinis projektavimo procesas neužtikrina, kad pradiniai užsakovo reikalavimai bus išpildyti.

Remiantis Merritt *et al.* (2000), tradicinio projektavimo trūkumai tradiciškai išryškėja dėl kitų aplinkybių:

1. Tikroji statybų kaina dažniausiai viršija numatytąją dėl projektinių pakeitimų statybos metu, vėlavimų ar nenumatytų darbo sąlygų – pvz.: prastų požeminių darbų sąlygų ir pan.
2. Statybos, naudojimo ar priežiūros darbų kaina tampa didesnė dėl projektavimo klaidų ar pradelsimų.
3. Projektavimo ir statybos darbų atskyrimas lemia nepakankamai įvertintą arba pervertintą statybos kainą bei priešiškus projektuotojų ir statybininkų santykius.
4. Orientuojamasi tik į pirminį užsakovo biudžetą. Tai vėliau gali lemti didesnes naudojimo, priežiūros ir remonto išlaidas.
5. Nėra tamprus architektų ir inžinierių bei konsultantų bendradarbiavimo siekiant optimalaus – į užsakovo poreikius orientuoto galutinio rezultato.

Šis palyginimas atskleidžia, kad labai daug veiksnių lemia tai, kad šiuolaikinis projektavimo procesas nebeatsiejamas nuo modernių technologijų taikymo, tamprus projekte dalyvaujančių grupių bendradarbiavimo ir šiek tiek pasikeitusios architekto pozicijos. Nors architektas atlieka vieną svarbiausių funkcijų, tačiau jo darbas turi eiti išvien su inžinieriais, projektuotojais, o modernių projektavimo ir modeliavimo priemonių taikymas leidžia greičiau rasti efektyvesnius sprendinius.

### 1.3.3. Inžineriniai projektavimo metodai

Kokybės funkcijos išskleidimo ir aksiomatinio projektavimo (toliau AP) metodai yra plačiai naudojami kitose inžinerinėse srityse, tačiau turi didelį potencialą būti

kartu pritaikyti integruoto pastato projektavimo kontekste – literatūroje aptikta tik keletas pritaikymo projektuojant pastatus pavyzdžių.

Kokybės funkcijos išskleidimo (KFI) metodas yra pakankamai gerai žinomas ir naudojamas projektavimo metodas, išrastas 1960-aisiais metais Japonijoje. Taisant šį metodą, užsakovo poreikiai ir lūkesčiai transformuojami į techninius reikalavimus, sudarant tam tikras matricų serijas, vadinamas kokybės funkcijos išskleidimo namu. Taip siekiama patenkinti ne tik klientų lūkesčius, bet ir pagerinti produkto kokybę (Shahi, Alipour 2016). Matricų serijomis užtikrinama, kad kiekvienas užsakovo reikalavimas bus atspindėtas bent vienu dizaino parametru. Architektui tai leistų geriau suprasti svarbiausius projekto dizaino parametrus.

Singgih *et al.* (2013) atkreipė dėmesį į KFI metodo taikymo privalumus: jis sumažina barjerus, siejamus su tarpfunkciniu produkto vystymu, padeda keisti korporacinę aplinką, sukuria apčiuopiamą naudą, pavyzdžiui: dar labiau sutrumpina ciklą, mažina vystymo kaštus ir didina našumą. Svarbus KFI privalumas – efektyviai identifikuojami, prioritetizuojami ir stabilizuojami vartotojų poreikiai.

KFI taikomas gana skirtingose atvejo analizėse (Shahi, Alipour 2016) integruo KFI, aksiomatinį projektavimą ir tvarų projektavimą orlaivio uodegos atžvilgiu, Yamashina *et al.* (2017) aprašė naują metodą, kuris sistemiškai integruoja KFI su TRIZ efektyviam ir sisteminiam techninių inovacijų naujiems produktams kūrimui. Singgih *et al.* (2013) pritaikė keturis KFI etapus, siekdami įvertinti ne tik kokybę, bet ir produktų vystymui skirtą laiką ir kaštus. Singhaputtangkul *et al.* (2013) pritaikė KFI sprendimų priėmimo problematikai vertindami privačių aukštų gyvenamųjų pastatų atitvarų medžiagas ir planus ankstyvajame projektavimo etape. Gilbert, Omar (2014) tyrimas pristatė naują sisteminių požiūrį į conceptualų statybinių projektų (konkrečiai – laikinųjų būstų) projektavimą derinant KFI ir aksiomatinį projektavimą taip užtikrinant, kad planas atitiktų vartotojų poreikius bei, laikantis loginės eigos, įgyvendins plano uždavinius.

Kitas paminėtas metodas, aksiomatinis projektavimas, yra projektavimo metodologija, naudojama keičiant įprastinį sprendimų priėmimą, kuris remiasi vien tik individualia patirtimi ir intuicija, į mokslinį požiūrį, kurio tikslas yra sukurti optimalų projektą (Sawaguchi *et al.* 2015). Šiuo metodu sukuriamas mokslinis ir sisteminis pagrindas, struktūruojantis projektavimo procesą inžinieriams. Pagrindinis AP tikslas yra sukurti mąstymo procesą, kuriuo remiantis kuriamas naujas projektas ir (arba) tobulinamas egzistuojantis projektas.

Aksiomatinio projektavimo teoriją, kaip projektavimo proceso dizaino principą, maždaug 1980 m. sukūrė Dr. Nam P. Suh (Masačusetso technologijos institutas). Dr. Nam Suh šį metodą išvystė siekdamas atrasti elementus, kurie yra bendri geriems projektams ir sugretinti juos su blogais projektais. Jo tyrimas orientavosi į santykį tarp poreikių ir jų patenkinimo, kurį apibūdina dvi aksiomos. Bet kokio projekto tikslas yra pasiekti aukščiausios kokybės projekto sprendinį, kuris patenkina

poreikius, taip pat, kiek įmanoma, sumažinant naudojamų išteklių kiekius (Benavides 2012; Hundal 2007). Šis aksiomatinio projektavimo proceso rezultatas yra struktūruotas aprašymas to, kaip mažiausiu iteracijų skaičiumi sistemiškai patenkiami visi vartotojo poreikiai (Timothy, Harðardóttir 2016).

Kai kurie tyrėjai atkreipia dėmesį į šiuos AP privalumus: AP leidžia kontroliuoti proceso ir sprendinio kokybę (Marchesi, Alessandro 2015), yra lankstus (Lindsey *et al.* 2013), padeda kurti kontroliuojamus ir valdomus projektus, kartu išpildant pradžioje nustatytus reikalavimus. Brown (2005) padarė išvadą, kad aksiomatinis projektavimas pašalina daugelį tradicinio projektavimo sukeltų sunkumų.

Aksiomatinis projektavimas buvo naudojamas idealumo ir idealių sprendinių projektavime koncepcijos atžvilgiu, ypatingai kreipiant dėmesį į sistemų inžineriją ir naujų produktų vystymą. Zhu *et al.* (2016) pritaikė AP projektuojant robotą, kuris naudojamas reabilitacijos procese. Cavique, Gonçalves-Coelho (2009) tyrė aksiomatinį projektavimą siekdami giliau išanalizuoti reguliacinius reikalavimus mažinant energijos sunaudojimą ŠVOK sistemose. Kahranab, Cebi (2009) pasinaudojo AP kaip vienu iš metodų daugiasavybinei parinkčiai kartu su atsinaujinančios energijos alternatyvomis. Kūrybinis AP buvo pritaikytas vizualaus meno projekte, kurio rezultatai pademonstravo, kad šis metodas palengvino inžinierių ir menininkų bendradarbiavimą ir bendravimą (Timothy, Harðardóttir 2016).

Pastatų projektavimas yra sudėtingas procesas, nes jame dalyvauja skirtingos grupės, kurios turi bendradarbiauti ir tikrinti savo sprendinius ankstyvajame projektavimo etape. Be to, čia esminį vaidmenį atlieka vartotojas, nes būtina patenkinti jo poreikius ir atsižvelgti į ribojimus. Procese taip pat egzistuoja kitų integruoto pastatų projektavimo proceso grupių interesai, nes reikia atsižvelgti ir į jų veikimo principus bei reguliavimą. Dėl šios priežasties KFI ir AP taikymas integruoto pastatų projektavimo procese yra naudingas, kiekvieno metodo teikiami privalumai pakeistų ir pagerintų tradicinį pastatų projektavimo procesą.

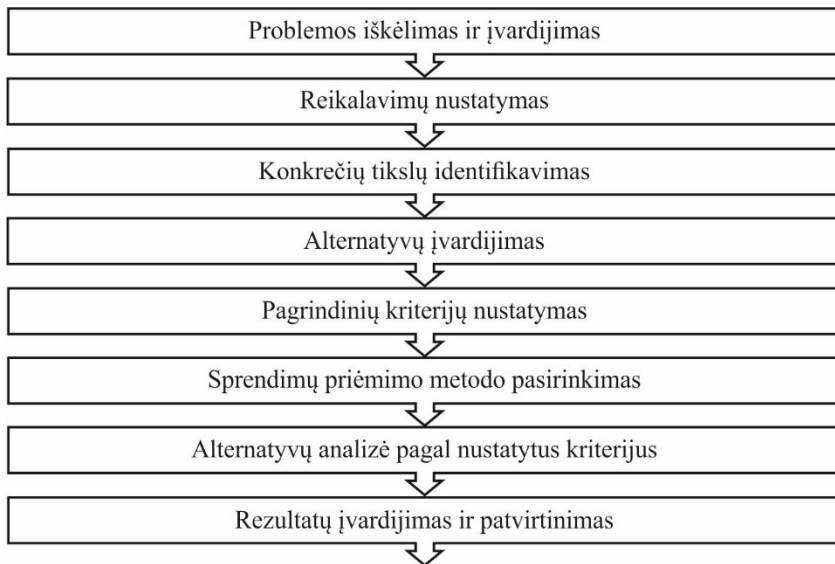
#### **1.3.4. Daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai**

Ankstyvojoje projektavimo stadijoje beveik visais atvejais susiduriama su optimizavimo ir/arba sprendimų priėmimo problema. Nagrinėjant keletą architektūrinių ar inžinerinių alternatyvų, pasirenkant statybines medžiagas ar gaminius, jų pasirinkimas būna apribotas daugeliu dažnai konfliktuojančių kriterijų, reglamentų ar užsakovo apribojimų.

Kadangi pastato projektavimo etape dalyvauja daug su projektavimu susijusių grupių, jų interesų sritys taip pat skirtingos. Tai reiškia, kad galutinis rezultatas turi atitikti ne tik kiekybinius, tačiau ir kokybinius reikalavimus (Kolokotsa *et al.* 2009; Schreyer, Bögl 2009; Hopfe 2009; Zavadskas, Turskis 2011). Šis



sprendimų priėmimo etapas tampa sudėtingas, bet labai svarbus tolesniam efektyviam detaliam projektavimui ir statybos etapui. Tai reiškia, kad visi reikalavimai/kriterijai turi būti identifikuoti, nustatyta kiekvieno jų svarba ir atliktas alternatyvų vertinimas pagal kiekvieną jų. Pagal Fülöp (2001), sprendimų priėmimo procesas sudarytas iš 8 pagrindinių žingsnių 1.6 paveiksle.



**1.6 pav.** Sprendimų priėmimo etapai (Fülöp 2001)

**Fig. 1.6.** The steps of decision making process (Fülöp 2001)

Ši nurodyta struktūra ir žingsniai gali būti panaudoti kaip bendra struktūra visiems metodams, tačiau išsiskiria etapuose reikalinga informacija ir jos tikslumas. Beveik visais atvejais daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai susideda iš šių dedamųjų:

- tikslas;
- sprendimų priėmėjas ar jų grupė;
- sprendinių alternatyvos;
- vertinimo kriterijai;
- rezultatai, jų analizė.

Daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai gali būti skirstomi į dvi grupes (Hopfe 2009):

- daugiaobjekčius, kai nagrinėjamos vektorinio maksimumo problemos;
- daugiaticslus, kai ieškoma atskirų sprendimų, kitaip tariant, reikalingas alternatyvų rangavimas.

Daugiaobjekčių ir daugiatislių sprendimų priėmimo metodų palyginimas pagal minėtas dedamąsias pateiktas 1.3 lentelėje (Sabaei *et al.* 2015).

**1.3 lentelė.** Daugiaobjekčių ir daugiatislių sprendimų priėmimo grupių palyginimas (Sabaei *et al.* 2015)

**Table 1.3.** Comparison between Multi Objective Decision Making and Multi Attribute Decision Making (Sabaei *et al.* 2015)

Savybės	Daugiatiksliai	Daugiaobjekčiai
Kriterijus	Savybės	Tikslai
Tikslas	Aiškus	Neaiškus
Požymiai	Aiškūs	Numanomi
Apribojimai	Neaiškūs	Aiškūs
Galimybės	Galutinės/aiškos	Negalutinės/neaiškos
Sąveika su sprendimo priėmėju	Silpna	Stipri/didelė

Sprendžiant su pastato projektavimu, statyba ir energiniu efektyvumu susijusias problemas, dažniausiai naudojamas daugiatislių sprendimų priėmimo metodas, tai yra arba dar proceso eigoje sprendžiama dėl galimų dedamųjų efektyvumo, arba siekiant rasti geriausią alternatyvos sprendinį, kai galutinis tikslas yra aiškus.

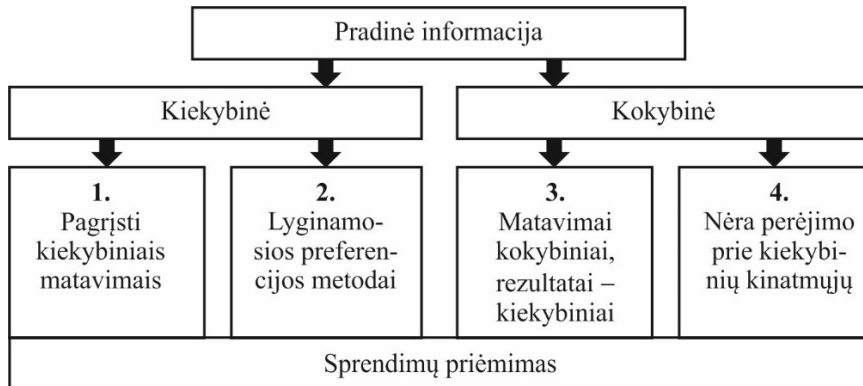
Pagal Laričev (2002), Ustinovičius (2003), Antuchevičienė (2005) normatyviniai sprendimų priėmimo metodai pagal pradinę informaciją gali būti klasifikuojami į keturias grupes 1.7 paveiksle ir apibūdinami taip:

1-osios grupės metodai yra pagrįsti kiekybiniais matavimais – t. y. tiek pradiniai duomenys tiek rezultatai yra kiekybinės išraiškos. Metodai griežtai pagrįsti aksiomomis. Alternatyvos gali lengvai būti palygintos tarpusavyje, nes jų naudingumas išreiškiamas kiekybine forma. Šios grupės metodų trūkumas, kad sudėtinga išvengti netikslumų dėl atliekamų matavimų. Vieni populiariausi šios grupės metodai – SAW (Simple additive Weighting), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), LINMAP (Linear Programming Techniques for Multidimensional Anglysis of Preference).

2-osios grupės – tai lyginamosios preferencijos metodai, kurie pagrįsti kiekybiniais matavimais, naudojant kelis indikatorius alternatyvoms lyginti. Metodų esmė sudaro porinis alternatyvų lyginimas, tikrinant vienos alternatyvos pranašumus kitos atžvilgiu. Nors šio grupės metodai mažiau jautrūs matavimo paklaidoms, tačiau dėl metodų nejautrumo gali nukentėti rezultatų tikslumas. Šiai grupei priskiriami tokie metodai – PROMETHEE I, II, ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Realite) grupės metodai, MELCHIOR, ORESTE, UTA ir kt.

3-iosios grupės metoduose pradiniai duomenys pateikiami kokybiškai, o rezultatai gaunami kiekybiška išraiška. Galima išskirti du pagrindinius pogrupius: neapibrėžtųjų aibių ir analitinės hierarchijos metodai.

4-osios grupės metoduose naudojami kokybiniai duomenys, nepereinant prie kiekybinių kintamųjų. Šiai grupei priskiriami verbalinės analizės metodai. Atliekamas žodinis alternatyvų vertinimas pagal tam tikrus kriterijus.



**1.7 pav.** Metodų klasifikacija pagal informacijos tipą (Laričev 2002; Ustinovičius 2003; Antuchevičienė 2005)

**Fig.1.7.** Methods classification according to the information type (Laričev 2002; Ustinovičius 2003; Antuchevičienė 2005)

Simanavičienė (2011) atliko jautrumo analizę ir palygino skirtingus daugiataksius sprendimų priėmimo metodus TOPSIS, COPRAS, SAW, tam taikant Monte Karlo modeliavimą. Atlikus metodų jautrumo analizę rodiklių reikšmių pasiskirstymo dėsnio atžvilgiu, nustatyta, kad metodas TOPSIS jautresnis pradinio duomenų pokyčiams negu SAW ar COPRAS. Šių metodų jautrumas yra panašus. Taip pat autorė rekomenduoja atkreipti dėmesį, jog rodiklių reikšmių paklaida  $\pm 5\%$  yra reikšminga alternatyvoms ranguoti. Norint gauti patikimą daugiakriterio sprendimo priėmimo rezultatą, rekomenduojama atsižvelgti į galimas rodiklių reikšmių paklaidas, rodiklių reikšmių pasiskirstymo dėsnius ir naudojamas rodiklių reikšmingumo reikšmes.

Keletą populiariausių sprendimų priėmimo metodų savo darbe pagal rezultatų pastovumą, darbo sąnaudas paruošiant skaičiavimus, metodo suprantamumą bei kitas savybes palygino Šaparauskas (2008) 1.5 lentelėje.

Šiame palyginime autorius išskyrė ELECTRE III metodą, nes nors ir įvertina rodiklių kintamumą, tačiau darbo sąnaudos tampa didelės, o suprantamumas – sudėtingas. Vieni populiariausių ir nesudėtingiausių metodų – SAW, TOPSIS – apima nedideles darbo sąnaudas, tačiau tik TOPSIS įvertina rodiklių kintamumą.

**1.5 lentelė.** Daugiakriterių sprendimų priėmimo metodų palyginimas (Šaparauskas 2008)  
**Table 1.5.** The comparison of Multi – criteria decision making methods (Šaparauskas 2008)

Metodai	Kriterijai			
	Rezultatų pas-tovumas	Darbo sąnaudos	Suprantamumas	Kitos savybės
SAW	pastovūs	nedidelės	paprastas	Išrenka idealią alter- natyva
MCDM-23	pastovūs	nedidelės	paprastas	
AHP	kintantys	nedidelės	paprastas	
ELECTRE III	kintantys	didelės	sudėtingas	Įvertina rodiklių kin- tamumą
TOPSIS	kintantys	nedidelės	paprastas	
MCCEM	kintantys	nedidelės	paprastas	

Apibendrinant galima daryti išvadą, kad kai nėra viena turima sprendinio alternatyva idealiai neatitinka keliamų reikalavimų, tikslingiausia būtų vertinti jas pasirinktų kriterijų atžvilgiu ir pasirinkti labiausiai juos atitinkančią (Sabaei *et al.* 2015). Pagal sprendžiamą problemą, galutinį rezultatą ir jų tikslumą pasirenkami daugiakriteriai sprendimų priėmimo metodai, kurių populiariausių palyginimas ir buvo atliktas.

### 1.3.5. Modeliavimo ir analizės įrankių vaidmuo pastato projektavime

Siekiant vykdyti Europos Komisijos keliamus tikslus didinti energinį efektyvumą ir skatinti naudoti atsinaujinančius energijos išteklius, pastatų projektavimo procesas ir naudojami įrankiai iš esmės pasikeitė. Su technologine projektavimo priemonių pažanga atsirado kitų imitacinių įrankių naudojimo poreikis.

Egzistuojančios pastatų modeliavimo priemonės leidžia nustatyti kelių siūlomų strategijų efektyvumą, kompleksiskai įvertinti daugelį su energiniu naudingumu, komfortu, tvarumu susijusių faktorių, optimizuoti investicijas ir sukurti sprendinį, orientuotą į keliamus reikalavimus. Labai svarbu, kad modeliavimo ir analizės įrankiai būtų taikomi laiku, t. y. dar ankstyvojoje projektavimo stadijoje, kai visi pakeitimai pigesni ir lengviau įgyvendinami. O Hetherington *et al.* (2011) pastebi, kad šie įrankiai buvo dažnai naudojami, kai pastato projektavimas beveik baigtas. Tada jau sunku padaryti esminius pakeitimus, taip pat slopinama iteracinio projektavimo praktika.

Punjabi (2005) pastebėjo tokias modeliavimo įrankių nenaudojimo priežastis: egzistuojančių priemonių naudojimas reikalauja įgūdžių, jų integravimo į pastato

projektavimo procesą sudėtingumas, reikalingi papildomi mokymai, duomenų įvestys reikalauja daug laiko. Visgi šiuolaikiniai modeliavimo/analizės įrankiai tampa vis draugiškesni vartotojams, palengvinamos duomenų judėjimo galimybės, sąsajos naudoti kelius modeliavimo įrankius.

Didelį dėmesį skiriant tvarių pastatų projektavimui, ne mažiau svarbu tampa išanalizuoti galimą pastato alternatyvą gyvavimo ciklo požiūriu – kad būtų galima parinkti tvaresnes medžiagas, būtų mažiau teršiama aplinka medžiagų gamybai, transportavimui, nepamirštant ir pastato naudojimo bei nugriovimo etapų. Priklausomai, kokie rodikliai reikalingi, kai kuriuos juos gali sumodeliuoti energinio modeliavimo priemonėmis, pvz., vertinant pirminę energiją, anglies dvideginio išsiskyrimą, tačiau detalesnei gyvavimo ciklo analizei jau taikomi specializuoti įrankiai.

Optimizavimo įrankiai gali būti naudojamo atskirai arba kaip papildoma integruota funkcija energinio modeliavimo priemonėse. Pagrindinis tikslas – optimizuoti galimą sprendinį naudojant tam tikrus metodus ir algoritmus.

Viena populiariausių energinio modeliavimo priemonių – EnergyPlus, naudojama ne tik inžinierių, architektų, tačiau ir tyrėjų. Programa skirta modeliuoti pastato šildymo, vėsinimo, apšvietimo, vėdinimo ir kitus energijos srautus. Tai konsolinė programa, kuri iš esmės skaito ir pateikia tekstinius įvesties/išvesties duomenis.

Autoriai šią programą naudojo optimizuoti skaidrius atitvarus, siekiant mažų energijos sąnaudų ir aukšto vizualinio komforto (Ochoa C.E. 2012; Fumo *et al.* 2010), įvertinti energijos suvartojimus per gyvavimo ciklą, CO<sub>2</sub> emisiją (Kneifel 2010), kuriant ThermalOpt metodiką (Welle *et al.* 2011). Šiame tyrime siekiant detalesnės apšvietos analizės, papildomai pasitelkiama Radiance priemonė per Open Studio platformą. Tačiau programa turi keletą išsamių grafinių sąsajų – tokių kaip DOE. Ši programa didžiąją dalį skaičiavimų atlieka su EnergyPlus, naudojant OpenStudio programų rinkinį.

DesignBuilder (DB) – tai viena populiariausių EnergyPlus programos grafinių sąsajų. Kaip įvesties duomenis naudojamos EnergyPlus konstrukcinių elementų duomenų bazės. DB programa turi į tris sritis orientuotus programos paketus – architektams, inžinieriams ir energijos vertintojams. Pati programa apima tokias galimybes: 3D modeliavimas, vizualizacija, sertifikavimas, modeliavimas, apšvietos ir ŠVOK analizė, finansiniai srautai, optimizavimas, LEED, skysčių/srautų dinamika. Dar vienas DesignBuilder pranašumas – parametrinė analizė, leidžianti įvertinti skirtingų parametų įtaką ir jų kitimą energijos suvartojimams, komfortui ir t. t. DesignBuilder panaudotas kaip modeliavimo įrankis siekiant įvertinti optimalius įstiklinimo plotus ir jų šiluminės-optines charakteristikas (Motuzienė 2010), pastato izoliacinės savybės ir jų įtaką vėsinimui (Ballarini, Corrado 2012), energinio modeliavimo priemonių palyginimui (Pajaujis, Motuzienė 2017), mažaeenergetinių pastatų gyvavimo ciklo analizei (Tulevech *et al.* 2018).

Zhang *et al.* (2013) aprašė pastato dizaino optimizavimo konkurso rezultatus, kur kaip pagrindinė priemonė buvo naudojama programa DesignBuilder. Pagrindiniai

tiksiai buvo optimizuoti pastatą pagal 4 pagrindinius kriterijus – minimizuoti anglies dvideginio išsiskyrimus dėl sistemų veikimo, statybų kainą, tenkinti ASHRAE komforto kriterijus, tenkinti minimalius apšvietimo reikalavimus. Nors daugelis sprendimų buvo priimta remiantis dizainerių asmenine patirtimi, visgi rezultatai parodė didelį modeliavimo įrankių/priemonių potencialą siekiant pagerinti pastatų energinį naudingumą ir sumažinti išlaidas. Rezultatai parodė, kad tai puiki pagalbinė priemonė priimant sprendimus visuose pastato gyvavimo ciklo etapuose.

Nguyen *et al.* (2014) nagrinėjo imitacinių programų panaudojimą optimizavimo srityje. Tyrimais nustatyta, kad pirmąją būtent EnergyPlus (37,2 %) ir TRNSYS (35,3 %) – dėl vartotojui ir susijungimui su optimizavimo programoms palankių tekstinių įvesties/išvesties duomenų pateikimo bei plačių pačių programų galimybių.

Egzistuojančios energinio modeliavimo priemonės dažnai turi apribotą informaciją, susijusią su poveikio aplinkai vertinimu, t. y. neapima viso pastato gyvavimo ciklo. Tačiau šiandien neužtenka sutelkti dėmesį tik į kuo mažesnes pastato energijos sąnaudas arba pradines investicijas. Pasak Schreyer, Bögl (2009) tik iš anksto detalizuoti ir apsvarstyti konstrukciniai sprendimai sumažinti energijos, naudojimo ir techninės priežiūros išlaidas per visą pastato gyvavimo ciklą. Siekiant detalesnės gyvavimo ciklo analizės yra pasitelkiamos pagalbinės kompiuterinės programos. Populiariausios jų: SimaPro, Athena, BEES, GaBi.

Viena populiariausių gyvavimo ciklo analizės programų pasaulyje yra SimaPro. Čia galima analizė pagal daugelį metodų, rezultatus galima analizuoti pagal keletą kriterijų, automatiškai įvertinti būtent pasirinktą medžiagų kiekį, sisteminėti duomenis, galima parametrinė analizė.

Valančius *et al.* (2018) panaudojo SimaPro pirminės energijos ir anglies dvideginio išsiskyrimo analizei, didinant pastatų šiluminę varžą renovuojamiems pastatams. Taip pat saulės energijos transformavimo sistemų gyvavimo ciklo vertinimui modernizuotuose pastatuose (Martinopoulos 2018), taip pat kuriant sprendimų priėmimo priemonę, vertinančią pastatų poveikį aplinkai (Sandanayake *et al.* 2019).

Mokslininkai, kurdami optimizavimo modelius ar atlikdami tyrimus naudoja gyvavimo ciklo analizės programas, norėdami: įvertinti energijos sąnaudas, anglies dvideginio išsiskyrimus per visą pastato gyvavimo ciklą, vertinti ir reitinguoti optimalius pastato konstrukcijų derinius (Crawford *et al.* 2011; Kneifel 2010; Basbagil *et al.* 2012).

Tačiau Peuportier *et al.* (2013) iškelia savotišką priešpriešą tarp energijos ir gyvavimo ciklo analizės specialistų – dabartinė tendencija statyti energiška efektyvius pastatus lemia šilumos izoliacijos didinimą, labai sandarių, trigubų stiklų langų poreikį, dėl ko didinamas poveikis aplinkai, reikalaujama didesnių sąnaudų medžiagų gamybai.

Literatūros analizė parodė, kad įvairių modeliavimo priemonių naudojimas tiek projektuojant naujus pastatus, tiek vertinant egzistuojančių pastatų atnaujinimą, leidžia iš anksto įvertinti galimų sprendinių energinį efektyvumą, poveikį

aplinkai, o esant konkretiems tikslams – optimizuoti reikiamus kriterijus. Šie analizės įrankiai tampa vis draugiškesni vartotojams ir vis labiau pritaikyti skirtingų programų sąsajoms.

### **1.3.6. Informacinio statinio modeliavimo ypatumai ir reikšmė naujų pastatų projektavime**

Besikeičiančios technologijos skatina tobulėti ne tik patį projektavimo procesą bet ir technologijas. BIM (liet. Informacinis Statinio Modeliavimas) – tampa neatsiejama šiuolaikinio projektavimo dalimi, kuri suteikia galimybę užtikrinti efektyvų bendradarbiavimą tarp visų projekte dalyvaujančių šalių.

BIM (*Building Information Modeling*) – tai procesas, kuriuo metu yra kuriama ir talpinama informacija, apimanti visus statinio gyvavimo ciklus: nuo koncepcijos kūrimo iki nugriovimo. Šio proceso metu yra kuriama ir valdoma visa statinio informacija visais jo gyvavimo ciklais, nuo pirminės projekto koncepcijos iki jo nugriovimo. Teigiama, kad BIM talpina pastato geometrinę, erdvinę, geografinę ir infrastruktūros informaciją, pastato kiekybinius ir kokybinius komponentų skaičiavimo rodiklius, energetinės, apšvietimo analizės rodiklius ir t. t.

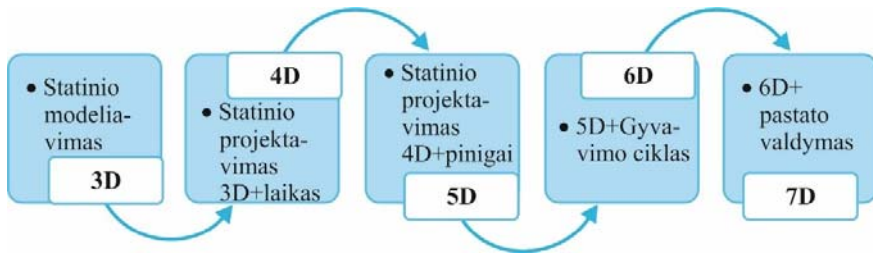
Visgi BIM yra daugiau nei skaitmeninis pastato formavimas (Kong 2010; Welle *et al.* 2011). Pagrindinis skirtumas nuo trimačio projektavimo 3D yra tas, kad pateikiama ne tik vizualizacija, tačiau ir talpinama visa su statiniu susijusi informacija (Gu *et al.* 2008). BIM sumažina statybų ir projektavimo laiką, išlaidas, poveikį aplinkai, padidina projekto efektyvumą, padeda išnaudoti energinio modeliavimo privalumus.

Analizuojant BIM taikymo pradžią ir lyginant keletą šaltinių (Gu *et al.* 2008; Attia *et al.* 2013), matyti, kad projektuotojų bendruomenė susidurdavo su tam tikrais sunkumais. Gu *et al.* (2008) aprašė daugelio projekte dalyvaujančių grupių apklausą siekiant išsiaiškinti pagrindinius trukdžius ir siekius, kad BIM būtų taikomas plačiau komerciniuose projektuose. Paaiškėjo, kad nors komercinės įmonės naudoja populiarių gamintojų Revit, Bentley, Archicad priemones, tai tėra pirmas žingsnis link tikrojo BIM ir jo sąveikos galimybių. Tam buvo pakankamai daug techninių, praktinių apribojimų: buvo sudėtinga keisti informaciją, mažai verslo suinteresuotumo, truko patirties, nebuvo bendros metodikos. Standartinių formatų tarp architektūros ir dizaino platformų nebuvimas buvo laikomas veiksniu, dėl kurio buvo sunku įgyvendinti BIM orientuotus projektus.

Kadangi projektuotojai dirba su įvairiausiomis programomis, išsaugoma skirtingais formatais, atsirado informacijos perdavimo standartizavimo poreikis. IFC (Pagrindinės pramonės klasės) pasaulyje yra vienas populiariausių veikiančių tarptautinių duomenų aprašymų formatų. Aljansas „buildingSMART“ buvo įkurtas iškilus informacijos perdavimo standartizavimo poreikiui, plėtojant automatizuotą pastatų projektavimą. Pagrindinis jos siekis buvo palengvinti sąveiką tarp

statybos, inžinerijos ir projektavimo atstovų. Šiuo metu IFC standarto importavimo ir eksportavimo galimybes palaiko daugelis programinės įrangos gamintojų, naujausios kompiuterinio pastatų modeliavimo programų versijos. Šis failo formatas skirtas informacijos mainams tarp atskirų projekto vykdytojų (inžinierių, architektų, konstruktorių, rangovų ir pan.), kas palengvina dalyvių bendradarbiavimą ir leidžia išvengti kartotinių klaidų.

BIM apima visas pastato gyvavimo ciklo fazes, todėl ir jo naudojimas apima kelias dimensijas (Hartmann *et al.* 2012; Song *et al.* 2012). BIM sprendimai (1.8 pav.) gali būti suskirstyti į keturis etapus: pradedant 3D – kai talpinama tik geometrinė informacija iki 7D, kuris apima statinio valdymą, priežiūrą, energinį efektyvumą ar gyvavimo ciklo analizę.



**1.8 pav.** BIM vystymosi etapai (Gu *et al.* 2008)

**Fig. 1.8.** The development stages of BIM (Gu *et al.* 2008)

BIM modelių apibūdinimui naudojami penki informacijos detalumo lygiai. LOD (angl. *Level of Development*) – tai sukurto modelio informacijos detalumo lygis ir talpinama informacija esant skirtingiems produkto kūrimo etapams – nuo pastato koncepcijos kūrimo iki jau esamo pastato (1.6 lentelė).

Jei LOD 100-300 skiriami projektavimo etapams, tai LOD 400 priskiriamas gamybos etapui, o LOD 500 – jau esamam pastatui. LOD modelių išsivystymo laipsnių skirstymas reikalingas tam, būtų galima išvengti perteklinės informacijos skirtingose pastato kūrimo fazėse.

Aksamija (2012) nagrinėjo informacijos dalijimosi formatus ir galimas modelio modifikacijas. Paprasčiausias *.dxf* formatas, talpinantis LOD100 modelį leidžia nagrinėti su pastato geometrija ir orientacija susijusius veiksnus, pvz., siekiant sumažinti saulės poveikį. Tačiau šiuo atveju įkeltas pastato modelis nebegali būti koreguojamas. Siekiant detaliausios analizės, naudojamas LOD 300, kuris pateikia plačiausią informaciją, bei leidžia daryti modelio pakeitimus



**1.6 lentelė.** Informacijos detalumo lygiai ir jų talpinama informacija**Table 1.6.** LOD (Levels of details) and their contained information

Informacijos detalumo lygis (LOD)	Modelyje talpinama informacija
LOD 100	apima bendrus pastato kontūrus, plotą, aukštį, tūrį, ir gali būti naudojamas analizuoti pastato orientacijai
LOD 200	apima modelio elementus, ne geometrinę informaciją
LOD 300	apima modelio elementus, tikslūs kiekiai, dydis, forma, vieta ir orientacija, pateikiamas informacijos kiekis toks pat kaip ir pateikiamas statybos dokumentuose
LOD 400	gamybos etapas
LOD 500	esamas/pastatytas pastatas

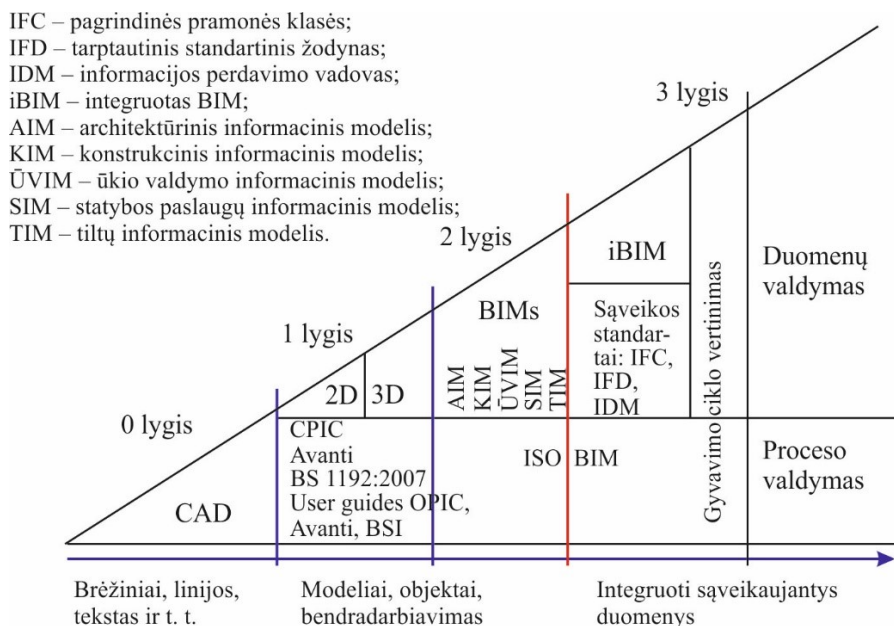
Pastato informacinio modelio (BIM) raidą būtų galima suskirstyti į keturis etapus: pirmojo etapo pradžia – pirmasis vektorinis braižymas, antrasis – 3D (trimačių) primitivų atvaizdavimas, trečiasis – pastato informacinis modeliavimas, ketvirtasis – išmanusis BIM („iBIM“). Pastato informacinio modelio tarpdalykinis koordinavimas tampa vis sudėtingesnis ir norint keistis duomenimis paprasto vektorinio duomenų standarto nepakanka, nes prarandama svarbiausia BIM modelio dalis – papildoma kokybinė informacija (Popov *et al.* 2006).

Detalūs BIM vystymosi etapai, talpinama informacija ir naudojami formatai pristatyti 1.9 paveiksle.

0 lygio BIM etapas talpina minimalius kompiuterinius 2D CAD brėžinius, taip pat įvairią popierinę dokumentaciją. 1 lygmens BIM etapas talpina jau išplėstus CAD brėžinius, kurie gali būti ir 3D formato arba talpinti suprojektuotas vizualizacijas pastato koncepcijos kūrimui.

2 lygio BIM talpina 3D brėžinius su papildoma informacija – jie dar atskiruose disciplininuose modeliuose, tačiau jau paruošti vieningame formate. Duomenys gali apimti 4D (statybos laikas) ir 5D (piniginiai srautai) BIM informaciją.

3 lygio BIM apjungia vieningą internetinį modelį, sujungiantį iš eilės 4D, 5D BIM sprendinius bei gyvavimo ciklo informaciją. Kartais tai vadinama i<sup>2</sup>BIM (integruotu BIM), skirtu pagerinti verslo rezultatus. 4 lygio BIM projektai atspindi bendruomenių poreikius ir norus, tobulinant ir keičiant siūlomus pastatus pagal užduotus reikalavimus.



**1.9 pav.** Informacinio statinio modeliavimo (BIM) vystymosi etapai (BSI 1192-4 (2014))

**Fig. 1.9.** The development stages of BIM (BSI 1192-4 (2014))

Savo tyrimuose BIM naudojo arba darbuose išsamiai aprašė šie autoriai: Schade *et al.* (2011); Schreyer, Bögl (2009); Watson (2011); Geyer (2012); Geyer, Buchholz (2012); Flager *et al.* (2009).

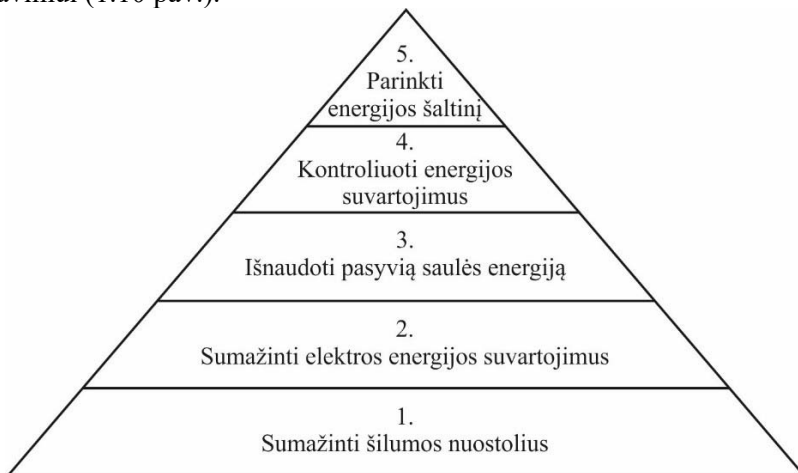
Taip pat autoriai kūrė metodikas BIM išplečiant į 4D dimensiją (Song *et al.* 2012; Hartmann *et al.* 2012), panaudojant LEED sertifikavimui (Kong 2010; Azhar *et al.* 2011), LCA ir LCC analizėms (Fies 2013; Yang 2013), statybos procesams (Zhang *et al.* 2012), GIS ir BIM integravimo galimybes (Irizarry *et al.* 2013).

Visgi galima teigti, kad kai projektai vykdomi BIM aplinkoje, projektas pereina į aukštesnį lygmenį, t. y. keičiasi ne tik projektavimo priemonės, tačiau ir procesas. Šiuo atveju atsiranda dideli privalumai tiek užsakovui, tiek architektui, tiek visai komandai. Pats projektavimo procesas, dalijimasis informacija tampa tikslesnis, leidžiantis išvengti žmogiškųjų klaidų, naudojamos technologijos leidžia projektuojamą pastatą nagrinėti plačiau ir giliau (konkrečiais aspektais per visą jo gyvavimo ciklą).

## 1.4. Pasyvios energinio projektavimo strategijos ir sprendiniai

Projektuojant aukšto efektyvumo pastatus, dar ankstyvojoje projektavimo stadijoje pirmiausia siūloma optimizuoti pastato apvaskalą, išnaudoti pasyvias energijos taupymo strategijas. Pastato apvaskalas, jo architektūriniai-konstruktiniai sprendiniai tiesiogiai lemia projektuojamas energetines sistemas ir jų įrangos galias. Pasyviosios projektavimo strategijos taip pat apima šešėliavimo technikas, galimybes išnaudoti pastato orientaciją ir sklypo aplinką, šilumos akumuliacijos ir natūralaus vėdinimo galimybes, išnaudoti dienos šviesą.

Dokka (2006) išskiria 5 žingsnių strategiją naujų mažaeenergių pastatų projektavimui (1.10 pav.).



**1.10 pav.** 5 žingsnių strategija naujų mažaeenergių pastatų projektavimui (Dokka 2006)

**Fig. 1.10.** 5-step strategy for designing new low-energy buildings (Dokka 2006)

Strategija sudaryta iš šių penkių žingsnių:

1. minimizuoti šilumos nuostolius (ir vėsinimo poreikius).
2. minimizuoti elektros sąnaudas.
3. išnaudoti pasyvią saulės energiją ir dienos šviesą.
4. kontroliuoti ir sekti energijos suvartojimus.
5. tiekti energiją ir atsinaujinančių energijos išteklių.

Literatūroje daug dėmesio skiriama pastato apvaskalo ir jo architektūrinių-konstruktinių sprendinių optimizavimui, pasyvių, energiją taupančių strategijų panaudojimui. Tolesniuose poskyriuose bus detalizuojami architektūriniai-konstruktiniai sprendiniai ir jų įtaka energiniam efektyvumui.

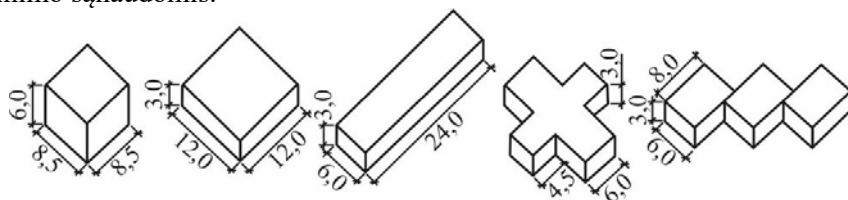
### 1.4.1. Pastato forma, kompaktiškumas ir orientacija

Pagrindinis rodiklis, apibrėžiantis pastatų architektūros/formos efektyvumą, yra kompaktiškumas. Kompaktiškumas paprastai išreiškiamas kaip paviršiaus ploto ir tūrio santykis.

Nagrinėjant pastatus, didžiausi šilumos nuostoliai yra per išorines atitvaras (paprastai langai, sienos), tad kuo pastatas kompaktiškesnis, tuo šilumos nuostoliai mažesni, reikalingi mažesni apšiltinimo medžiagų kiekiai, mažiau šilumos tiltelių. Šis parametras išlieka svarbus per visą pastato gyvavimo ciklą – tiek statybos tiek nugriovimo proceso metu – tiesiogiai lemia medžiagas ir energijos kieki, reikalingą jas išgauti, apdoroti, transportuoti, statyti, nugriauti ir perdirbti. Pastatas, turintis mažesnę išorinio apvalkalo plotą, bet tokį patį šildymo plotą – mažiau švaistys energiją naudojimo fazėje. Tačiau prastesnę kompaktiškumo indeksą turintys pastatai turi didesnę potencialią naudojimo fazėje – galima geriau išnaudoti atsinaujinančią energiją (Parasonis *et al.* 2012).

Moksliniame lygmenyje nagrinėjama pastato formos/kompaktiškumo įtaka energijos poreikiams (Rieksti 2011; Catalina, Virgone 2011), siekiant sumažinti nepalankias vėjo sąlygas (Kim *et al.* 2011), kuriant mažaeenerginis pastatus (Gratia 2003), siekiant padidinti pastatų energinį efektyvumą (Parasonis *et al.* 2010), skirtingoms klimato zonoms (Ordoñez *et al.* 2014).

Ordoñez *et al.* (2014) nagrinėjo pastato formos įtaką administracinės paskirties pastatui įvairiose klimatinėse zonose. Autoriai nustatė, kad aukštesni pastatai turi mažesnę efektyvumą šilto klimato zonose, žemesni pastatai – mažiausią efektyvumą šaltojo klimato. Be kita ko, labai žemi, labai aukšti ar ištęstos formos pastatai lemia prasčiausius rezultatus. Taigi sienų ploto/tūrio, išorinių paviršių/tūrio ir sienų ploto/tūrio santykiai turi tiesioginę koreliaciją su apšvietimo, šildymo ir vėsinimo sąnaudomis.



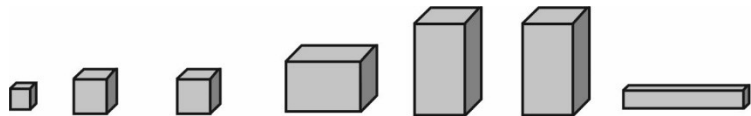
Pastato kompaktiškumo indeksas				
1,24	1	0,92	0,92	0,84
Šildymo sąnaudų palyginimas				
0,93	1	1,074	1,076	1,179

**1.11 pav.** Pastato formos įtaka šildymo sąnaudoms (Gratia 2003)

**Fig. 1.11.** The influence of building form to energy consumption for heating (Gratia 2003)

Gratia (2003) (1.11 pav.) teigė, kad visi ne stačiakampio formos, sudėtingos architektūros/išplanavimo pastatai, turintys sudėtingus sujungimus tarp komponentų, lemia didesnių šilumos tiltelių ir šilumos nuostolių atsiradimą. Todėl siekiant padidinti pastato efektyvumą, geriau mažinti pastato apvalkalo plotą, nei didinti šilumos izoliaciją ar keisti įstiklinimo plotus. Be to efektyvesnis pastato kompaktiškumas lemia mažesnes išlaidas ne tik dėl mažesnių energijos sąnaudų, tačiau ir dėl mažesnių statybos išlaidų. Autorius taip pat nustatė, kad pastato kompaktiškumo indeksui svyruojant nuo 0,84 iki 1,24, energijos sąnaudos šildymui skiriasi, t. y. sumažėja iki 25 %.

Pastatai, turintys vienodą formą ir tūrį, gali skirtis vidiniu išdėstymu, aukštų skaičiumi ir šildomu plotu, todėl santykinis kompaktiškumo indeksas gali būti netikslus.



Išmatavimai: ilgis/plotis, aukštis, m	3/3/3	9/9/9	9/9/9	15/15/15	12/12/30	12/12/30	33,54/33,54/3
Aukštų skaičius	1	2	3	5	10	11	1
Išorinio apvalkalo plotas ( $A$ ), $m^2$	54	486	486	1350	1728	1728	2652,5
Šildomas plotas ( $S$ ), $m^2$	9	162	243	1125	1440	1584	1125
Vidinis tūris ( $V$ ), $m^3$	27	729	729	3375	4320	4320	3374,8
Geometrinis efektyvumas ( $GE=A/S$ )	6	3	2	1,2	1,2	1,09	2,36

**1.12 pav.** Pastato formos įtaka geometriniam efektyvumui (Parasonis *et al.* 2012)

**Fig. 1.12.** The influence of building form on geometric efficiency (Parasonis *et al.* 2012)

Parasonis *et al.* (2012) patobulino šią formuluotę: siūlo išorinės sienos ploto ir tūrio santykį pakeisti ( $A/V$ ) į išorinės sienos ir šildomo ploto santykį ( $A/S$ ) bei šį santykį pavadinti geometrinio efektyvumu (geometric efficiency – GE) (1.12 pav.).

Matyti, kad pastatai, turintys tokį pat išorinio apvalkalo plotą, tačiau didesnę šildomą plotą (daugiau aukštų) – lemia geresnę geometrinę efektyvumą – nors kompaktiškumo indeksas būtų vienodas.

Tinkamas pastato orientavimas yra taip pat viena iš pasyvaus projektavimo strategijų, paprastai apibūdinama kaip azimuto kampas šiaurės kryptimi. Tinkama orientacija sumažina energijos sąnaudas bei leidžia maksimaliai panaudoti saulės ir vėjo energiją. Tad šių strategijų modeliavimas ankstyvojoje projektavimo stadijoje ypač svarbus, nes architektūriniai pakeitimai šiame etape kainuoja mažiau.

Nowak, Sliwin (2016) pastebėjo, kad kuo daugiau pastato formos skiriasi nuo kvadrato, tuo efektyvesnė orientacija (su ilgesniu fasadu, esančia Š–P kryptimi) suteikia geresnių rezultatų mažinant energijos sąnaudas. Tą patvirtino Vallandares-rendón *et al.* (2017). Kontoleon, Zenginis (2017) taip pat pabrėžė pietinės ir šiaurinės orientacijų ypatumus. Pastato zonos, esančios pietinėje orientacijoje pasižymi didesniais šilumos pritekiais, o šiaurinės zonos – didesniais šilumos nuostoliais. Abanda, Byers (2016) naudojo skaitmeninį pastato modeliavimą ir kitas modeliavimo priemones, kuriomis nustatė, kad tinkamas pastato orientavimas leidžia sutaupyti didelį energijos kiekį per visą pastato gyvavimo ciklą.

#### **1.4.2. Pastato įstiklinimo plotas ir geometrija**

Šiuolaikiniai pastatai dabar neįsivaizduojami be didžiulių įstiklintų fasadų, kurie dažnai ne tik sukuria geresnę estetinę išvaizdą, vizualinį komfortą, tačiau ir kiek supaprastina statybos procesą. Aktyviai skatinant ekonomiškų, energiška efektyvių pastatų projektavimą, čia susiduriama su problema – kaip optimizuoti įstiklinimus, tinkamai parinkti jų plotus, išsidėstymą ir fasado medžiagas.

Šios temos plačiai analizuojamos mokslinėje literatūroje. Jei anksčiau daugiau dėmesio buvo skiriama įstiklinimo įtakai atskirai šildymo, vėsinimo (Harmati, Magyar 2015) ir apšvietimo sąnaudoms (Negendahl, Nielsen 2015), tai dabar didelis dėmesys skiriamas bendroms energijos sąnaudoms (Hoffmann *et al.* 2016; Motuziene 2010), poveikiui aplinkai per visą pastato gyvavimo ciklą (Azari *et al.* 2016).

Per skaidrias atitvaras atsiranda didžiausi šilumos nuostoliai ir didžiausi šilumos pritekiai. Didesni plotai suteikia didesnę vizualinę komfortą, sumažina dirbtinio apšvietimo poreikį (Raji *et al.* 2015), tačiau vasarą sukelia diskomfortą dėl per aukštos temperatūros, taip išdidinant poreikius pastato vėsinimui. Taigi susiduriame su optimizavimo problema (Romani *et al.* 2015), kai šiltuoju sezonu langų plotus reiktų minimizuoti, o žiemos metu – maksimizuoti. Čia tampa svarbios ne tik skaidrių atitvarų šiluminės/optinės savybės, bet ir optimalus plotas, geometrija ir išsidėstymas išorės atitvaroje (Harmathy *et al.* 2016).

Goia (2016), pasirinkęs ilgo administracinio pastato modelį, ieškojo optimalaus langų/sienų santykio taikant bendrą energinio efektyvumo kriterijų. Analizė buvo kartojama skirtingose Europos klimato juostose esančioms šalims. Gautos išvados parodė, kad kiekvienu analizuojamu atveju, net ir esant skirtingoms orientacijoms skirtingose klimato zonose, ideali įstiklinimo reikšmė randama ganėtinai siaurame spektre, t. y. 30–45 %. Išimtiniai atvejai buvo į pietus nukreiptame fasade arba labai šalto klimato zonose, kur šis kitimas didesnis. Lyginant optimalų variantą su blogiausiu skaidrių atitvarų/sienų santykiu, energijos sąnaudos galimai išaugtų 5–25 %.

Maksimali rekomenduotina sienų – langų santykio reikšmė komerciniams pastatams pagal ASHRAE 90.1 Energy Standard yra 40 % visose klimato zonose. Susorova *et al.* (2013) tyrime padarė išvadą, kad skaidrių atitvarų/sienų santykio kitimas bendras energijos sąnaudas labiausiai lemia giliose patalpose karšto klimato šalyse bei negiliose patalpose šalto klimato šalyse. Sąlyginai maža atitvarų/sienų santykio įtaka vidutinio gylio patalpose. Visgi šalto klimato šalyse dideli įstiklinimo plotai padidina šilumos nuostolius ir energijos sąnaudas, nes šildymo sąnaudos yra pagrindinė dominantė bendruose energijos poreikiuose. Čia mažesni langai labiau pageidautini šiaurinėje orientacijoje ir didesni langai pietinėje, nes taip sumažinamos energijos sąnaudos šildymui.

Thalfeldt *et al.* (2013) nagrinėjo galimus pastato fasado derinius šalto klimato zonoje – Estijoje. Rezultatai parodė, kad dvigubiems ir trigubiems langams – atitvarų/sienų santykis nustatytas mažiausias galimas pagal natūralaus apšvietimo reikalavimus – 22–24 %. Atvejams, kai projektuojami keturių ir penkių stiklų langai – atitinkamai 40 % ir 60 %. Ekonomiškai optimalus įstiklinimo variantas priimtas – trigubas žemos emisijos stiklas, kurio įstiklinimo plotas 25 % (sienų apšiltinimas 200 mm ( $U = 0,16 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ )). Atliktas ribotas kiekis modeliavimų Centrinės Europos klimatui parodė, kad trigubo stiklo su dvigubu žemos emisijos stiklu įstiklinimo santykis turėtų būti apie 40 %. Raji *et al.* (2015) teigia, kad esant energiškai efektyviems administracinio pastato fasado parametrams (žemos šilumos perdavimo koeficiento reikšmės sienoms ir įstiklinimams), didžiausias energijos sutaupymas yra, kai atitvarų/sienų santykis yra apie 50 %. Teigiama, kad tai tinkamas balansas, siekiant mažinti šilumos nuostolius ir didinti saulės priteikių patekimą šaltuoju metu. Labai panašūs rezultatai nustatyti Ochoa *et al.* (2012). Amsterdame klimatui nustatytas optimalus įstiklinimas svyruoja nuo 50 iki 70 %. Teigiama, kad didesni įstiklinimai tiesiog sudarys sąlygas švaistyti elektros energiją bei išdidins bendras energijos sąnaudas, o mažesni nei 50 % įstiklinimai neužtikrins vizualinio komforto ir tinkamo apšvietimo efektyvumo. Motuzienė (2010) nustatė, kad administraciniam pastatui Lietuvos ir panašaus (šalto) klimato zonoje energiškai efektyviausias santykinis fasado įstiklinimas yra 20 % pietų, rytų bei

vakarų fasadams ir 20–40 % šiaurės fasadui. Tačiau energiškai efektyviausias derinys netenkina higienos reikalavimų, todėl optimalus variantas yra mažiausias leidžiamas higienos normų.

Visgi kalbant apie skaidrias atitvaras, be išvardytų parametrų ne mažiau svarbi yra ir langų padėtis/išsidėstymas atitvaroje, kuri turi įtaką energijos poreikiams, šildymui, vėsinimui ir apšvietimui. Elektros sąnaudos yra lemiamos ne tik priklausomai nuo langų dydžio, tačiau ir jų formos, pozicijos atitvaroje. Kim *et al.* (2016) panaudojo BIM technologiją ir gyvenamam namui suprojektavo 64 skirtingų langų dydžio, orientacijos ir pozicijos scenarijus, analizavo jų įtaka bendriems energijos poreikiams. Rezultatai parodė, kad lango pozicija turi didžiausią įtaką energijos sąnaudoms, kai santykinis fasado įstiklinimas yra 20 %. Tolesnis modeliavimas parodė, kad prie šių sąlygų mažiausiai energijos sąnaudų reikalauja variantas, kai langai yra vidutiniame aukštyje visoms orientacijoms, o rytinių langų pozicija labiausiai lemia bendrus rezultatus. Bokel (2007) nagrinėjo skirtingas langų pozicijas (žemai, viduryje ir aukštai) bei skirtingą įstiklinimo plotą nuo 10–90 % esant skirtingiems vartotojų valdymo profiliams (aktyvus, pasyvus ir rankinis) administraciniam pastatui Olandijoje. Rezultatai parodė, kad žemiausioje pozicijoje esantys langai šiek tiek pranašesni vertinant pirmines energijos sąnaudas šildymui (ypač esant mažiems langams), tačiau tokia pozicija ne tokia veiksminga vertinant pirminę energiją apšvietimui, bendrus PE poreikius ir vertinant estetinį vaizdą. Aukščiausia lango pozicija galėtų būti pranašesnė nebent darbo vietoms, esančioms tolimesniu atstumu nuo lango.

### 1.4.3. Langų šiluminės optinės savybės

Pastaruoju metu langų gamyba žengia labai sparčius žingsnius technologinės pažangos link: tobulinamos langų rėmų ir stiklo paketų konstrukcijas, jų šiluminės, optinės charakteristikos, taip atveriant platesnes galimybes architektams.

Iki šiol architektūriniai sprendiniai, susiję su skaidriomis atitvaromis buvo vienas aktualiausių optimizavimo uždavinių, nes lemia daugelį veiksnių: šiluminį, vizualinį komfortą, energinį ir ekologinį efektyvumą. Taip pat tos pačios langų savybės gali skirtingai lemti skirtingu metų laiku, pvz., šilumos pritekių patekimas yra aktualus žiemą, tačiau vasarą tik padidina energijos sąnaudas vėsinimui. Projektuojant mažaenerginis pastatus, skaidrių atitvarų šiluminės optinės savybės bei įstiklinimo plotai paprastai yra ribojami, tad gerėjant jų savybėms, atsiveria platesnės galimybės įvairesniems architektūriniam sprendiniams.

Pagrindinės charakteristikos, apibrėžiančios langų savybes – tai šilumos perdavimo koeficientas  $U$  ( $W/m^2 \cdot K$ ), visuminės saulės praleisties faktorius  $g$  (%) ir šviesos praleisties faktorius  $LT$  (%).  $LT$  (%) parodo kiek procentų saulės šviesos praleidžia stiklas, todėl dažniausiai vertinamas analizuojant patalpų vizualinį komfortą. Visuminės saulės energijos praleisties faktorius  $g$  (%) parodo, kokia



dalį saulės energijos, nukreiptos į langą, į vidų patenka kaip šilumos energija. Paprastai pastatuose, kuriuose siekiama sumažinti energijos sąnaudas vėsinimui, pasirenkami stiklai su žema  $g$  rodiklio reikšme, o siekiant išnaudoti pasyvią saulės energiją – kuo didesne. O šilumos perdavimo koeficientas  $U$  ( $W/m^2 \cdot K$ ) – tai koeficientas, kuris lig šiol buvo kaip vienas svarbiausių rodiklių. Paprastai jis susideda iš šilumos perdavimo koeficiento lango rėmui ir stiklui. Mažėjant šiam koeficientui, mažiau šilumos prarandama per šiuos atitvarų elementus.

Šiuo laiku langų efektyvumas didinamas naudojant tokius technologinius sprendinius kaip: skirtingas dujinis užpildas tarp stiklų, specialios langų plėvelės, sumažinančios saulės pritekį, taip pat dinaminiai (išmanieji) stiklo paketai, kurie keičia savo optines savybes.

Šalyse, kuriose dominuoja pastatų šildymas, paprastai pageidaujamas kuo žemesnis šilumos perdavimo koeficientas (kad būtų galima minimizuoti šilumos nuostolius), kuo didesnis  $g$  faktorius (kad saulės pritekiai sumažintų šildymo sąnaudas) ir didesnis  $VT$  maksimaliai išnaudoti dienos šviesą.

Pasak (Ander 2016) pastatuose, kuriuose vyrauja dideli šilumos pritekiai (administraciniai – dėl žmonių, naudojamos įrangos), tinkamai parinkti įistiklinimo sprendimai gali leisti sutaupyti nuo 10–40 % energijos sąnaudų apšvietimui ir ŠVOK sistemoms. Taip pat teigiama, kad langų ir stiklų projektavimas/analizė turėtų būti vykdoma kompleksškai – užsakovui ir projektavimo komandai aptarus pagrindinę projektavimo problemą, turėtų būti įvertinti kiti faktoriai (Ander 2016): šilumos pritekiai ir nuostoliai, vizualiniai reikalavimai, apsaugos nuo saulės priemonės ir šešėliavimas, šiluminis komfortas, prevencija/kontrolė kondensacijos susidarymui, akustikos kontrolė, dienos šviesos patekimas, energiniai reikalavimai.

Literatūroje nagrinėjami ekonomiškai efektyviausi langų sprendiniai (Loukaidou *et al.* 2017) siekiant geresnių pastato energinių charakteristikų (Gosselin, Dussault 2017; Hee *et al.* 2015), padidinti šiluminį ir vizualinį komfortą (Dussault, Gosselin 2017), įvertinti ekologiniais aspektais (Matthew, Mourshed 2015).

Pacheco *et al.* (2012) atlikdamas tyrimus pabrėžė, kad projektuojant langus, kurie riboja saulės spinduliuotės patekimą, turėtų būti įvertinta, kad šių langų naudojimas per daug nelemtų vidaus apšvietimo ar šviesumo kokybės. Nowak, Sliwin (2016) taip pat pastebėjo problemą, susijusią su vizualiniu komfortu – saulėtomis dienomis pastebimas nevienodas dienos šviesos pasiskirstymas, ypač pietinėje orientacijoje. Taip pat keičiantis saulės padėčiai, labai padidėja dienos apšvietos vertė patalpų dalyje arčiausiai išorinio stiklo.

Dussault *et al.* (2012) kaip ir daugelis autorių išskyrė orientacijų svarbą nagrinėjant bet kokius energiją taupančius sprendinius, o šiuo atveju – išmaniųjų langų integraciją. Būtent šiaurinėje orientacijoje šios technologijos naudojimas mažai efektyvus, o kitose orientacijose leidžia sutaupyti nuo 8 iki 51 %. Ir pabrėžė, kad naudojant šias technologijas ir minimizavus ne tik šildymo bet ir vėsinimo

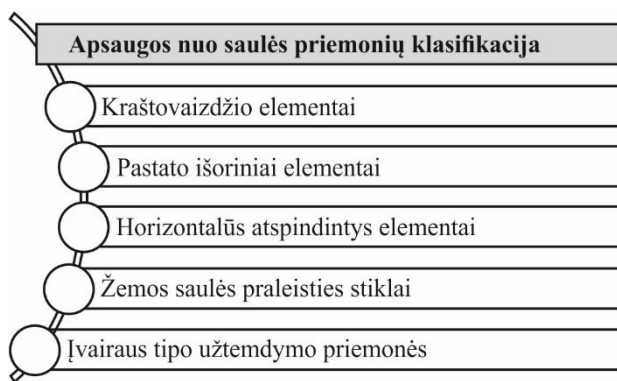
išlaidas, galima stipriai sumažinti ekologinius rodiklius. Lee, Won (2017) nagrinėjo langų optines savybes ir pabrėžė, kad projektuojant administracinės paskirties pastatus, dar sprendimų priėmimo metu prioritetas turėtų būti teikiamas ne pradinėms investicijoms, bet būsimoms energijos sąnaudoms, kur pastebėtas tiesinis energijos poreikių mažėjimas prie stiklų efektyvumo didinimo.

#### 1.4.4. Apsaugos nuo saulės priemonės

Projektavimo normose STR 2.01.02: 2016 teigiama, kad siekiant išvengti patalpų perkaitinimo ir didelių išlaidų pastatų vėsinimui, turi būti kontroliuojami skaidrių atitvarų plotai, būtinas apsaugos nuo saulės priemonių projektavimas. Tarptautinė Energetikos Agentūra pabrėžia apsaugos nuo saulės priemonių ir derinių su tinkama pastato orientacija bei diniminiu saulės kontrolės reguliavimu svarbą. Tai turėtų tapti standartine energiška efektyvių pastatų projektavimo strategija, o tam tikrose situacijose – pritaikyta ir egzistuojantiems.

Pasirinkus tinkamas apsaugos nuo saulės priemones ir reguliavimo strategijas – kontroliuojama tiesioginė saulės šviesa ir saulės šilumos pateikimas vėsinimo sezono metu bei išnaudojami šilumos pritekiai žiemą (Kirimtat *et al.* 2016). Visgi pasirinkus netinkamus sprendinius, susiduriama su situacija, kai šių priemonių naudojimas gali vienu metu taupyti vėsinimo išlaidas, tačiau išdidinti energijos sąnaudas šildymui ir dirbtiniam apšvietimui arba atvirkščiai (Li *et al.* 2016).

Pagal Prowler (2016) apsaugos nuo saulės priemonės gali būti klasifikuojamos kaip: kraštovaizdžio elementai, pastato išoriniai elementai, horizontalūs atspindintys elementai, žemos saulės praleisties stiklai, įvairaus tipo užtemdymo priemonės 1.13 paveiksle.



1.13 pav. Apsaugos nuo saulės priemonių klasifikacija pagal (Prowler 2016)

Fig. 1.13. The classification of solar shading devices (Prowler 2016)

Pasak Bellia *et al.* (2008), apsaugos nuo saulės priemonės gali būti skirstomos į reguliuojamas ir fiksuotas. Šios turėtų būti kruopščiai projektuojamos, kad atitiktų planuojamą paskirtį – tinkamai suprojektuotos sukuria balansą tarp apsaugos nuo saulės ir dienos šviesos patekimo. Vidinės žaliuzės yra vienos populiariausių ir dažniausiai tiriamų šešėliavimo priemonių administraciniuose pastatuose. Kitos būtų išorinės žaliuzės, vidinės ritinės žaliuzės bei iškyšos (Valladares-rendón *et al.* 2017). Moksliniame lygmenyje (Kirimtat *et al.* 2016) šešėliavimo priemonės analizuojamos vertinant jų poveikį vizualiniam ir šiluminiam komfortui (Yun *et al.* 2014; Li *et al.* 2016; Nowak, Sliwin 2016) energiniam efektyvumui (Han *et al.* 2017; Koo *et al.* 2014; Khin *et al.* 2016), priimant skirtingas dienos šviesos panaudojimo strategijas (Tsikra, Andreou 2017), taip pat vertinamas šešėliavimas, atsirandantis dėl šalia esančių pastatų ar augalų (Ichinose *et al.* 2017; Adedoyin *et al.* 2014). Azari *et al.* (2016), Babaizadeh *et al.* (2015) analizavo apsaugos nuo saulės priemones gyvavimo ciklo požiūriu.

Ye *et al.* (2016) palygino vidinių žaliuzių efektyvumą su išorinėmis. Tyrimai parodė, kad jei išorinės ir vidinės žaliuzės pagamintos iš vienodų medžiagų ir turinčios tokias pat geometrines savybes, vidinės žaliuzės savo efektyvumu visgi nusileidžia išorinėms. Taip pat pabrėžė ir išorinių žaliuzių trūkumus, ypač aukštesnėse pastatuose – jas sunku sumontuoti, prižiūrėti ir remontuoti Tačiau koreguojant saulės spindulių perdavimą, atspindėjimą bei vidinių žaliuzių atstumą nuo lango, šio tipo žaliuzės gali pasiekti puikų, o kartais net geresnį energinį efektyvumą nei išorinės. Toks patvirtinimas galėtų sumažinti bendrą savikainą ir padidinti lankstumą projektuojant pastato fasadus.

Thalfeldt *et al.* (2013) ištyrė išorinių žaliuzių poveikį energijos poreikiams. Visais atvejais išorinių žaliuzių naudojimas padidina šildymo ir apšvietimo energijos sąnaudas ir sumažino vėsinimo išlaidas. Tai pagerino pirminės energijos suvartojimo rezultatus tik tais atvejais, kai projektuojami didesni langai. Be to, tiek Hutchins (2015), Thalfeldt *et al.* (2013), Li *et al.* (2016), Khin *et al.* (2016) patvirtino, kad kiek ryškesnis žaliuzių poveikis atsiranda, kai pritaikyta rytų vakarų orientacijoms arba pietų-vakarų kryptyse. Hutchins (2015) išorines žaliuzes įvardijo kaip efektyviausią priemonę saulės kontrolei ir vidaus temperatūrai mažinti. Vidinės žaliuzės efektyviausios šilumos izoliacijai ir kaip priemonė kontroliuoti tiek dienos šviesą, tiek išvengti akinimo ir vizualiam komfortui. Kompleksinis išorinių ir vidinių žaliuzių naudojimas yra optimali priemonė vėsinti, šildyti, mažinti poreikius ir gerinti vizualinį komfortą. Pilotinėje studijoje autorius nustatė apsaugos nuo saulės priemonių potencialą – galimi sutaupymai iki 60 % apšvietimui, 20 % vėsinimui ir 26 % elektros suvartojimui. Valladares-rendón *et al.* (2017) daugiau dėmesio skyrė horizontalių ir vertikalinių žaliuzių palyginimui. Buvo padaryta išvada, kad horizontalios buvo ypač veiksmingos pietų, vakarų ir rytų orientacijose, be to, buvo energiška efektyvesnės vėsinimo sąnaudoms lyginant su vertikaliosiomis. Meerbeek *et al.* (2016), Khin *et al.* (2016), Iwata *et al.*

(2017) tyrė automatines žaliuzes administraciniuose pastatuose. Tinkamu algoritmu kontroliuojamos automatinės žaliuzės yra viena efektyviausių strategijų tiek mažinant energijos suvartojimą, tiek gerinant žmonių komforto sąlygas, ypač atviro tipo biuruose. Thalfeldt *et al.* (2017) savo tyrime kūrė ir pabrėžė automatinių žaliuzių valdymo algoritmo svarbą – kad jis ne tik būtų efektyvus, tačiau ir nesukeltų diskomforto dirbantiems žmonėms. Pavienių išorinių žaliuzių naudojimo galimi energijos sutaupymai priklauso nuo daugelio faktorių: pastato paskirties, orientacijos, langų šiluminių optinių savybių ir t. t., o nustatyti galimi sutaupymai vėsinimui svyravo nuo 10 %. Khin *et al.* (2016) – iki 30 % Hutchins (2015), vėsinimui ir iki 30 % elektrai (Iwata *et al.* 2017).

Tad galima daryti išvadą, kad apsaugos nuo saulės priemonių projektavimas ir pritaikymas naujai statomiems pastatams išties neišvengiamas, tačiau tampa iššūkiu pasirinkti tinkamas jų savybes bei reguliavimo galimybes. Čia modeliavimo priemonių naudojimas ankstyvojoje projektavimo stadijoje padeda išanalizuoti galimas alternatyvas, suprasti jų įtaką skirtingiems kriterijams.

## 1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Literatūros analizė parodė, kad pastato kūrimo ir projektavimo procesas stipriai keičiasi dėl griežtėjančių ES energinių ir klimato kaitos stabilizavimo reikalavimų, technologinės dinamikos, padidėjusių projekto apimčių bei projekte dalyvaujančių grupių.
2. Nors integruoto pastato projektavimo (IPP) principai ir skaitmeninio projektavimo (BIM technologija) priemonės yra svarbūs šiuolaikinio pastato kūrimo veiksniai, bet moksliniai tyrimai rodo, kad energinio efektyvumo, IPP ir BIM sąveika vis dar yra gana didelis iššūkis projektuojant pastatus.
3. Liberalios rinkos sąlygomis auga skirtingų projekte dalyvaujančių grupių skaičius, poreikis derinti jų interesus, juos nustatyti ankstyvojoje projektavimo stadijoje, nes čia priimti sprendiniai darys įtaką visam pastato gyvavimo ciklui. Tyrimai rodo, kad iškyla sunkumai optimizuoti daugelį tarpusavyje prieštaraujančių, bet su pastato projektavimu susijusių kriterijų, todėl projektavimas tampa sudėtingesnis ir sprendinio sudarimas atitolinamas nuo optimalaus.
4. Įvertinus literatūroje sprendžiamus su pastatų projektavimu susijusius optimizavimo uždavinius matyti, kad pastato apvalkalas, jo architektūriniai, konstrukciniai sprendiniai yra vieni svarbiausių ir plačiausiai nagrinėjamų optimizavimo krypčių. Taikomos ir vertinamos įvairios pasyvios energinio projektavimo strategijos leidžia minimaliomis priemonėmis sukurti energiškai efektyvesnius architektūrinius sprendinius.

5. Literatūros apžvalga leido nustatyti tradicinio ir IPP dalyvių, eigos ir procesų skirtumus, taip pat identifikuoti tradicinio pastatų projektavimo sunkumus, atsirandančius dėl projektavimo proceso vienpusiškumo, siekiant estetiško vaizdo. Rezultate tokie sprendimai padidina techninių sistemų galingumus, investicijas ir lemia iš esmės neefektyvų projektavimo procesą, neužtikrinantį užsakovo lūkesčių ar reikalavimų.
6. Nustatyti ir parinkti du kitose inžinerijos kryptyse žinomi metodai – kokybės funkcijos išskleidimo ir aksiomatinio projektavimo, kuriuos pritaikant pastatų projektavime galima tikėtis projekto dalyvių interesus labiau suderinančio proceso ir rezultato.
7. Įvertinus atliktus tyrimus ir taikomus pastato projektavimo metodus, siūloma sukurti projektavimo technologiją (procedūrų algoritmą ir parinkti joms atlikti tinkamus įrankius, priemones), kuri apjungtų kokybės funkcijos išskleidimo ir aksiomatinio projektavimo metodus kartu su šiuolaikiniais modeliavimo ir projektavimo įrankiais bei sumažintų pagrindinius tradicinio projektavimo trūkumus. Technologijos sprendimų priėmimo etape siūloma integruoti kompleksinio proporcingo vertinimo metodą COPRAS, kuris, kartu su aksiomatinio projektavimo informacijos aksioma, sudarytų platesnes galimybes optimalaus sprendinio priėmimui.

Įvertinus mokslinėje literatūroje išnagrinėtus klausimus ir atsižvelgus į disertacijos darbo tikslą, svarbu išspręsti šiuo uždavinius:

1. Bendrame tvarių pastatų projektavimo kontekste įvertinti jų energinio funkcionalumo sprendinių bei integruoto pastato projektavimo principų taikymo reikšmę.
2. Nustatyti metodus, vertinančius ir derinančius vartotojo poreikius, formalius reikalavimus ir sprendimų teikėjo gebėjimus. Įvertinti šių metodų integravimo į pastato projektavimo procesą galimybes.
3. Sudaryti pastato darnaus sprendinio paieškos detalizuotą procedūrų seką, pritaikant ir integruojant pasirinktus metodus bei įrankius pastatų projektavimui, modeliavimui bei vartotojo lūkesčių ir projektavimo komandos gebėjimų suderinimui.
4. Patikrinti sukurto pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmo veiksmingumą energiškai funkcionaliam sprendiniui gauti. Gautus rezultatus palyginti su tradicinio projektavimo metu gautu sprendiniu.



---

## Siūloma pastato koncepcijos rengimo technologija

Šiame skyriuje pristatoma siūloma pastato koncepcijos rengimo technologija (procedūrų algoritmas) bei detalizuojami šioje technologijoje integruojami metodai: kokybės funkcijos išskleidimo (KFI) metodas, aksiomatinis projektavimas (AP) bei daugiakriteris sprendimų priėmimo metodas COPRAS. Taip pat pristatytos numatomų technologijoje projektavimo bei modeliavimo priemonių sąsajų galimybės.

Skyriaus tematika paskelbti trys autorės straipsniai (Lapinskienė *et al.* 2013; Lapinskienė *et al.* 2017; Lapinskienė, Martinaitis 2017).

### 2.1. Pastato projektavimo trukdžių identifikavimas

Remiantis 1.3 poskyryje atlikta apžvalga ir projektavimo procesų palyginimu, išryškėjo pagrindiniai tradicinio projektavimo trūkumai/trukdžiai ir esminiai skirtumai lyginant su integruotu pastato projektavimu (IPP). Literatūroje atskleidžiama, kad vienas pagrindinių skirtumų atsiranda dėl architekto vaidmens visame pastato projektavimo procese. Be to tradiciniame projektavimo procese išskyla sunkumai,

kai arba labai mažai arba per mažai derinami projekto dalyvių lūkesčiai. Net ir IPP projektavimo procese pasigendama šios procedūros algoritmizavimo.

Tai parodo, kad kartu yra poreikis labiau atsižvelgti į visų projekto dalyvių – o ypač užsakovo lūkesčius, bet juos suderinti.

Kadangi pagrindinė problematika kilo iš literatūros ažvalgos ir jau buvo detalizuota, tad buvo atlikta internetinė anketinė apklausa, siekiant tai patvirtinti.

2017 m. kovo 27 d. buvo pradėta vykdyti apklausa, siekiant detalizuoti pastato projektavimo etapą: išsiaiškinti pagrindinius užsakovų ir architektų lūkesčius bei prioritetus. Taip pat buvo siekiama sužinoti integruoto ir skaitmeninio pastato projektavimo paplitimą bei galimų naujų projektavimo modelių reikalingumo svarbą.

Internetinėje apklausų sistemoje *www.apklausa.lt* buvo sukurta apklausos anketa „Integruotas projektavimas“ (<https://apklausa.lt/private/forms/integruotas-pastato-projektavimas-tc58k1r/entries>) (nuoroda prieinama asmeniniu kvietimu). Anketa buvo prieinama asmeniniu pakvietimu, todėl buvo išsiųsta konkrečioms projektavimo įmonėms, kurių bent viena specializacijų – architektūra. Tikslas buvo surinkti atsakymus, kurie atspindėtų būtent architektų požiūrį į pastatų projektavimo procesą.

Anketoje pateikti 9 klausimai, kuriuose arba reikėjo sužymėti tinkantį variantą iš pateiktųjų, arba nurodyti savo atsakymą. Aktualiausi klausimai buvo pateikti siekiant išsiaiškinti svarbiausius projektavimo kriterijus architektams ir jų klientams. Detalus apklausos aprašas pateiktas A priede.

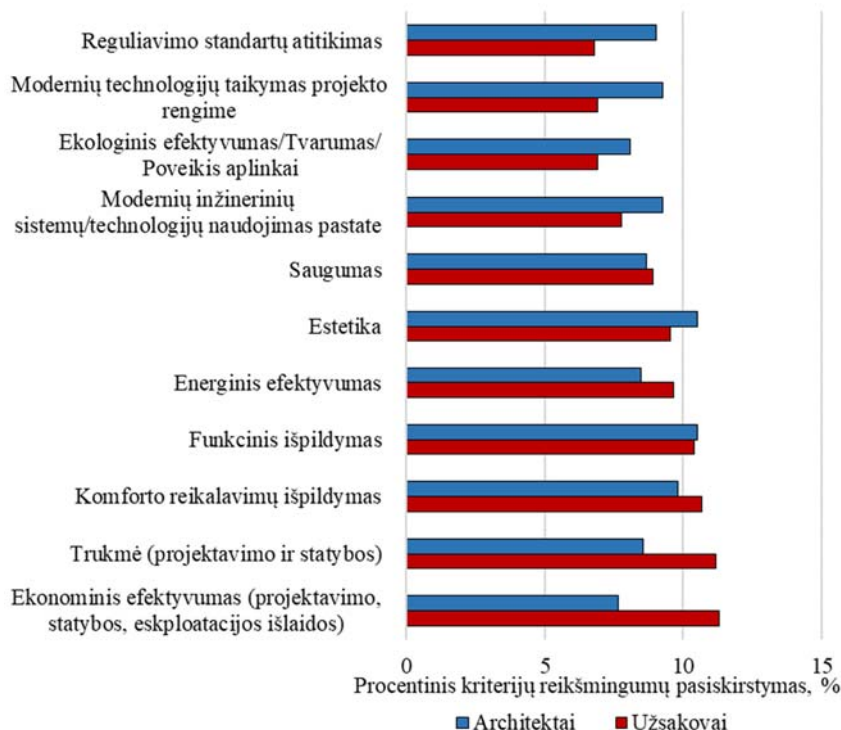
Rezultatai parodė (2.1 pav.), kad architektams projektuojant pastatus, svarbiausi kriterijai yra šie: estetika (10,5 %) bei funkcinis išpildymas (10,5 %), o mažiausiai svarbus – ekonominis efektyvumas (projektavimo, statybos, eksploatacijos išlaidos) (7,66 %). Buvo įvardyta, kad architektų užsakovams svarbiausi kriterijai – ekonominis efektyvumas (projektavimo, statybos, eksploatacijos išlaidos) (11,29 %) ir trukmė (projektavimo ir statybos) (11,17 %), mažiausiai aktualus – reguliavimo standartų atitikimas (6,78 %). Rezultatai parodė, kad rengiant projektą, architektų ir užsakovų prioritetai stipriai skiriasi. Ir būtent ekonominis efektyvumas, kuris svarbiausias užsakovui – mažiausiai svarbus architektui. Energinis efektyvumas taip pat mažai svarbus architektams, tačiau kiek svarbesnis užsakovams. Tokia situacija atskleidžia, kad dažnai susiduriama su sunkumais norint suderinti architekto ir užsakovo prioritetus.

Tad pastato projektavimas yra nemažai iteracijų reikalaujantis procesas – 52,6 % architektų įvardijo, kad visgi atsiranda situacijų, kai architektūriniai sprendiniai neatitinka užsakovo lūkesčių. 50 % apklaustųjų architektų papildomai atlieka 5–10 pakeitimų iki galutinio varianto, 11,2 % tenka atlikti daugiau nei 20 pakeitimų.

Apklausos rezultatai rodo, kad ligi šiol norint pakeisti tam tikrus architektūrinius sprendinius, architektai dažniausiai vadovaujasi architekto patirtimi



(45,2 %), 29 % apklaustųjų naudoja specializuotas gaires, 16,1 % – programinę įrangą, mažiausias procentas apklaustųjų (9,7 %) nurodė kitą variantą, t. y. konsultacija arba sprendinio paieška iš šalies, t. y. specializuotų įmonių.



**2.1 pav.** Apklausos dalyvių projektavimo kriterijų procentinis reikšmingumų pasiskirstymas  
**Fig. 2.1.** The percentage significance distribution of of design criteria

Praktika rodo, kad vien architekto patirtimi kuriami pastatai dažnai būna orientuoti vienpusiškai – siekiant estetikos ir dėl to stipriai nukenčia kiti faktoriai, pvz., energinis efektyvumas, nes sistemos turi būti projektuojamos jau esamiems architektūriniais sprendiniais.

Siekiant geriau suprasti, kas būtų naudingiausia architektams pastato projektavimo etape, beveik pusė apklaustųjų įvardijo rekomendacinės sistemos naudą, kuri nurodytų pagrindines pastato sistemas ir jų galimas variacijas, lemiančias užduotus reikalavimus (pvz.: architektūriniai sprendiniai, didinantys energinį efektyvumą, tvarumą ir t. t.). Ją pasirinko 44,1 % apklaustųjų. Taip pat kaip viena svarbių įvardyta architekto ir užsakovo reikalavimų/kriterijų suderinamumo sistema (23,5 %).

Kadangi šiuolaikinis projektavimas neatsiejamas nuo modernių technologijų taikymo ir grupių bendradarbiavimo, apklausoje pateikti klausimai dėl projektų rengimo BIM platformoje ir dalyvavimo integruotame pastato projektavime. Nors rezultatai buvo panašūs ir respondentai nurodė, kad 52,6 % jų ruošia projektus BIM platformoje, tačiau integruotame pastato projektavime dalyvauja 36,8 %. Populiariausius projektavimo įrankius respondentai įvardijo: Autocad, Archicad, Revit.

Tai ypač svarbu, nes įvairių modeliavimo programų taikymas bei paties IPP principų taikymas leidžia jau ankstyvojoje projektavimo stadijoje patikrinti tam tikrų sprendinių efektyvumą ir užtikrinti pagrindinių reikalavimų įgyvendinimą.

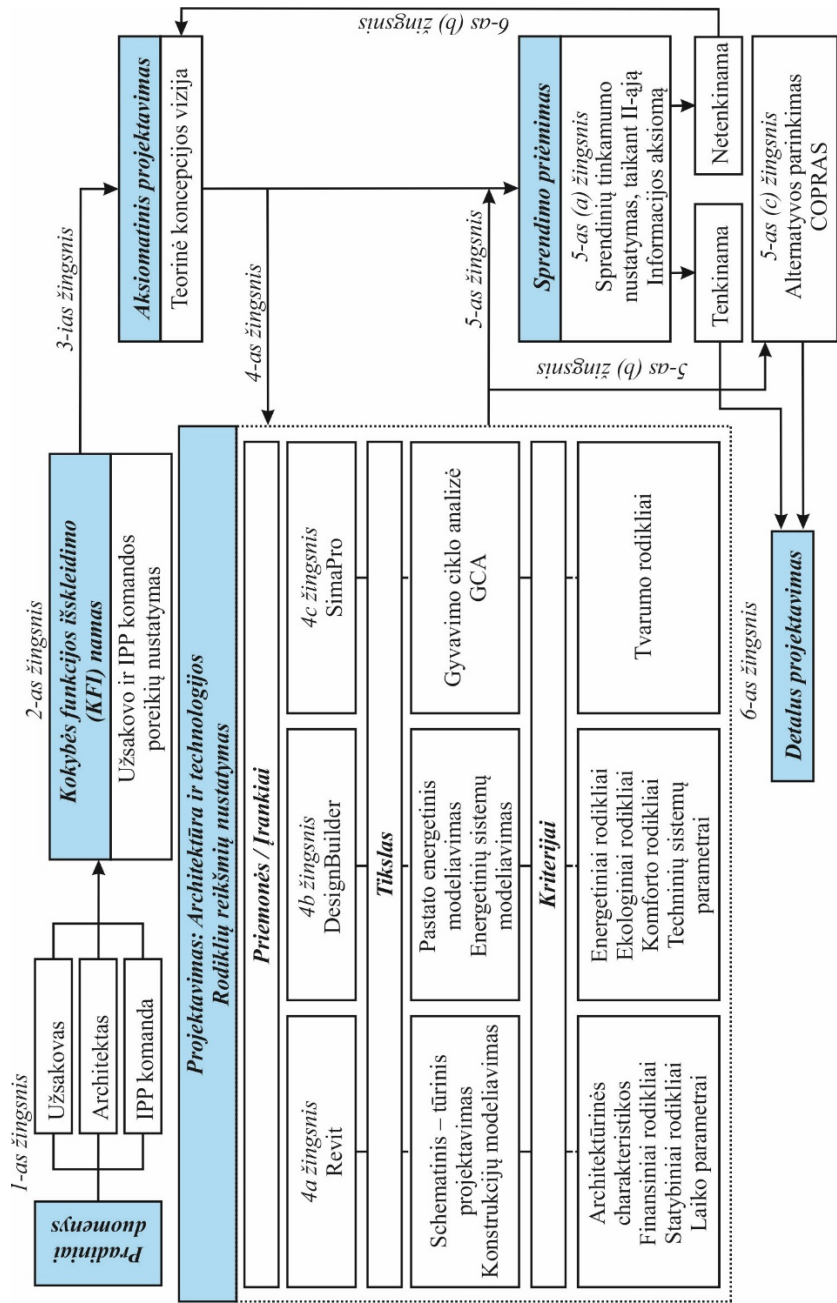
Apklausos rezultatai parodė egzistuojančius architektų ir užsakovų projektavimo prioritetų skirtumus, pagrindinius tradicinio projektavimo trūkumus ir leido identifikuoti naujų projektavimo pagalbinių priemonių poreikį. Augantis modernių projektavimo priemonių naudojimas leidžia sukurti efektyvesnius ir labiau į pirminius reikalavimus orientuotus sprendinius.

## 2.2. Pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmas

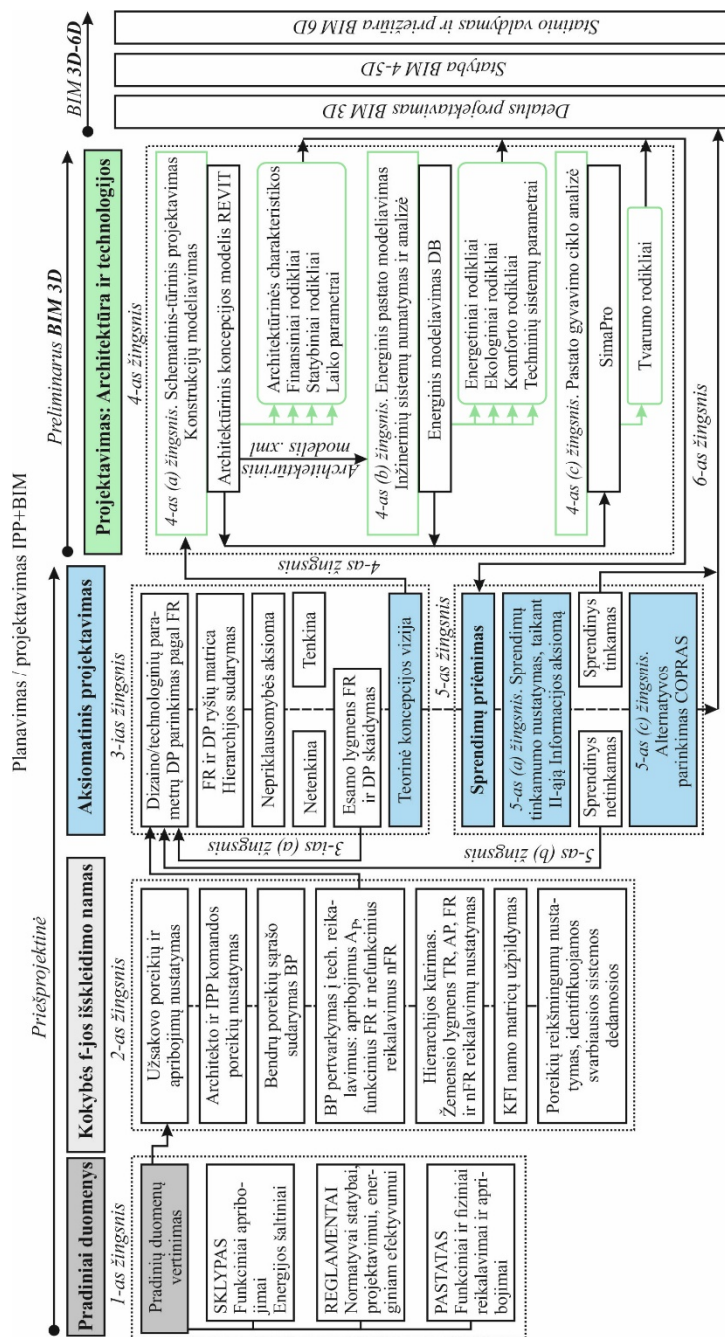
Šio skyriaus pagrindinis tikslas – pristatyti sukurtą pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmą, kuriame integruoti kokybės funkcijos išskleidimo ir aksiomatinio projektavimo metodai leidžia eliminuoti pagrindinius tradicinio projektavimo trūkumus ir nuo pirmųjų projekto rengimo etapų apjungti visas IPP dalyvių grupes.

Atlikta apklausa įrodė, kad tradiciniame projektavime iš esmės skiriasi architektų ir užsakovų interesai, t. y. architektams aktualesnė estetika, o užsakovui – piniginės ir laiko sąnaudos. Tačiau pastato projektavime dalyvauja ir kitos grupės – inžinieriai, kurie, remiantis ES reikalavimais, daug dėmesio turi skirti energiniam efektyvumui ir poveikiui aplinkai. Kai šios grupės nebendradarbiauja tarpusavyje, sunku užtikrinti šiuos reikalavimus. Inžinieriai pritaiko inžinerines sistemas jau esamiems architektūriniais sprendiniais – taip išdidindami sistemų galias, energijos sąnaudas ir išlaidas. Esant IPP grupių bendradarbiavimo galimybėms ankstyvojoje projektavimo stadijoje, skaitmeninio projektavimo ir modeliavimo priemonėmis galima optimizuoti ir įvertinti reikalingus finansinius, energinius, ekologinius ir kt. kriterijus. Todėl šios sukurtos technologijos taikymas siekiant parengti pastato koncepciją leidžia greičiau ir efektyviau surasti į pradinis reikalavimus orientuotą sprendinį.

Pateiktos 2 schemos: bendroji 2.2 paveiksle ir detalizuota 2.3 paveiksle. Pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmas sudarytas iš 6 pagrindinių žingsnių sekos, kurioje dalyvauja visa integruoto pastato projektavimo (IPP) komanda, užsakovas ir projekto konsultantas. Kiekvienas šių žingsnių detalizuotas.



2.2 pav. Bendroji siūloma pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmo schema  
Fig. 2.2. General scheme of suggested Building sustainable solution search algorithm



2.3 pav. Detalizuota siūloma pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmo schema  
Fig. 2.3. Detailed scheme of suggested Building sustainable solution search algorithm

1-as žingsnis – Pradinių duomenų analizė. Turint pagrindinę užduotį (tikslas, numatomo pastato paskirtis), visos projekte dalyvaujančios grupės individualiai susipažįsta su esama sklypo lokacija, galimais pastato ir sklypo fiziniais ir funkciniais apribojimais, normatyviniais dokumentais.

2-as žingsnis – kokybės funkcijos išskleidimo (KFI) namo taikymas. Pagrindinis šio žingsnio tikslas – identifikuoti ir išreitinguoti svarbiausius projekto kriterijus, nustatyti galimus apribojimus bei paruošti inžinerinius parametrus kurti koncepciją.

Algoritme siūloma, kad nuo pirmų žingsnių turi dalyvauti visa IPP komanda ir užsakovas. Projekto konsultantas šiame žingsnyje paruošia apklausos anketas, kur visi dalyviai įvardija savo lūkesčius ir reikalavimus projektui. Sudarius jų sąrašą, užsakovas turi teisę reitinguoti šiuos reikalavimus, t. y. iš savo pozicijos įvardyti jų svarbą. Projekto konsultantas, esant poreikiui – bendradarbiaudamas su IPP komanda – šiuos lūkesčius transformuoja į inžinerinius-techninius parametrus: apribojimus, funkcinis ir nefunkcinis parametrus.

Sekant KFI namo metodo principais – užpildomos santykių matricos, nustatoma, kuris funkcinis reikalavimas yra svarbiausias, kaip techniniai parametrai sąveikauja tarpusavyje. Sugretinamos dvi duomenų sritys – pereinama iš užsakovo duomenų sritys į funkcinę duomenų sritį. Ši informacija bus svarbi ir informatyvi tolesniame etape siekiant rasti į pradinius reikalavimus orientuotą sprendinį.

3-ias žingsnis – aksiomatinio projektavimo taikymas ir pastato koncepcijos teorinio modelio sudarymas. Čia aksiomatinis projektavimas susideda iš dviejų dalių (3-io ir 5a žingsnio). 3-iaame žingsnyje pereinama iš funkcinės duomenų sritys į fizinę duomenų sritį, t. y. Zigzaginiu gretinimo principu sukuriamos funkcinų reikalavimų – dizaino parametų hierarchinės schemos. Kiekvienas projektinis parametras turi tenkinti nepriklausomybės aksiomą. Netenkinant šios aksiomos, atliekamas esamo lygmens FR ir DP skaidymas ir pereinama į (3-ias (a) žingsnis), kur iš naujo atliekamas dizaino/projektinių parametų DP parinkimas pagal FR.

Hierarchinių schemų žemiausio lygio projektiniai parametrai nurodo sprendinius (inžinerinius parametrus), kurie turėtų būti panaudoti kuriant pastato koncepcijos viziją. Šias parametų schemas kuria projekto konsultantas esant poreikiui įtraukdamas IPP grupės narius. Atsižvelgiant į šiuos sprendinius, architektas sukuria teorinę koncepcijos viziją, kuri projektuojama/modeliuojama kitame žingsnyje.

4-as žingsnis – pastato architektūros sukūrimas ir modeliavimas. Algoritme siūloma, kad architektūrinis modeliavimas atliekamas (4-as (a) žingsnis), o vėliau, priklausomai, kokių kriterijų reikšmės reikia rasti, atliekamas energinis modeliavimas (4-as (b) žingsnis), Pastato gyvavimo ciklo analizė (4-as (c) žingsnis). Tai reiškia, kad jau ankstyvajame projektavimo etape, galime patikrinti priimtų architektūrinių sprendinių efektyvumą ir įtaką energiniams, ekologiniams ir kt. parametrams.

Pagal 3-iaame žingsnyje numatytus projektinius parametrus ir sudarytą teorinę pastato koncepciją, architektas ją suprojektuoja siūlomu atveju programoje Revit.

Esant keletui dizaino sprendinio galimybių ir siekiant patikrinti jų energinį efektyvumą, atliekamas modeliavimas programoje DesignBuilder. Energinį modeliavimą turi atlikti energijos inžinieriai, o duomenis, skirtus priimti sprendimą, paruošia projekto konsultantas. Algoritme nurodyta, kad galimas automatinis pastato modelio transportavimas iš architektūrinės programos Revit į DesignBuilder.

Jei buvo nustatyta, kad pastato koncepcija turi atitikti tam tikrus gyvavimo ciklo rodiklius – atliekama gyvavimo ciklo analizė ir gaunami reikiami rodikliai SimaPro programos pagalba. Tai turėtų atlikti projekto konsultantas. Šiai analizei gali prireikti įvesties/išvesties duomenų iš architektūros sukūrimo ir modeliavimo bei energinio modeliavimo.

Architektui ar inžinieriams turint keletą dizaino sprendinio alternatyvų bei atlikus jų modeliavimą – gavus tam tikrus efektyvumo rezultatus – seka sprendimų priėmimas.

5-as žingsnis – sprendimų priėmimas. Čia galimos dvi situacijos: kai pradinuose projekto etapuose yra numatytos konkrečios skaitinės sprendinių reikšmės – ieškoma sprendinio, kuris jas labiausiai atitinka (pvz., numatytos konkrečios energijos sąnaudos). Antruoju atveju, siekiama rasti geriausią alternatyvą vertinant pagal projekto pirmuosiuose etapuose identifikuotus užsakovo ir IPP komandos poreikius ir jų reikšmingumus.

Pirmuoju atveju taikoma aksiomatinio projektavimo informacijos aksioma (5-as (a) žingsnis). Informacijos aksioma teigia, kad sprendinys su didžiausia tikimybine reikšme gali būti traktuojamas kaip geriausias sprendinys. Jei aksioma tenkinama – sekama (6-as žingsnis) ir pereinama į detalųjį projektavimą.

Jei aksioma netenkinama (5-as (c) žingsnis), siūloma grįžti pakoreguoti hierarchines projektinių parametrų schemas, pagal kurias kuriama koncepcija. Tai lieka projekto konsultanto atsakomybėje, todėl pakoreguota schema perduodama architektui. Procesas kartojamas.

Turint keletą alternatyvių sprendinių ir sumodeliavus reikiamų kriterijų reikšmingumus, geriausias variantas gali būti išrinktas vadovaujantis sprendimų priėmimo metodu COPRAS (5-as (b) žingsnis). Tai turėtų atlikti projekto konsultantas, vadovaujantis 2-ajame etape identifikuotais projekto kriterijais. Patvirtinti galutiniai rezultatai pateikiami architektui ir pereinama į detalaus projektavimo etapą (6-as žingsnis).

### **2.1.1. Kokybės funkcijos išskleidimo metodas**

Pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmo 2-ajame žingsnyje integruotas kokybės funkcijos išskleidimo (KFI) metodas. Pagrindinis 2-ojo žingsnio tikslas – identifikuoti ir išreitinguoti svarbiausius projekto kriterijus, nustatyti galimus apribojimus bei paruošti inžinerinius parametrus koncepcijai kurti. Tai pasiekama sekant KFI metodiką bei užpildant KFI matricas, vadinamomis KFI namais. Čia

identifikuojama techninių rodiklių tarpusavio koreliacija, kas architektui toliau leidžia efektyviau kurti pastato koncepciją.

Kokybės funkcijos išskleidimo metodas (KFI) buvo sukurtas 1966 m. Yoji Akao Japonijoje siekiant valdyti produkto plėtrą: suprasti ir tinkamai įvertinti užsakovo lūkesčius, poreikius bei transformuoti juos į technines-gamybines charakteristikas, taip pat pagerinti produkto/paslaugos kokybę.

Metodas gali būti taikomas bet kurioje produkto vystymo ar kūrimo stadijoje, kur pagrindinis tikslas yra sukurti produktą, kuris atitiktų užsakovo reikalavimus ir lūkesčius bei dar ankstyvoje fazėje identifikuoti esminę vystymo raidą (Chahadi *et al.* 2007).

Galima išskirti 3 pagrindinius KFI taikymo tikslus (Creative Industries Research Institute [CIRI] 1994):

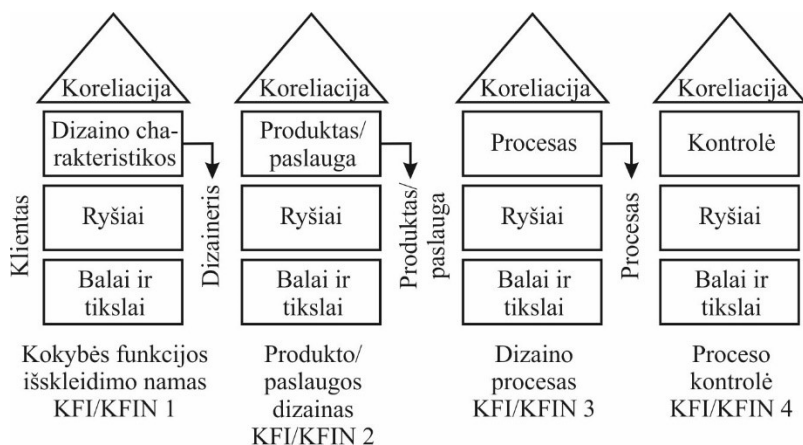
1. Išreitinguoti užsakovo poreikius ir kriterijus.
2. Transformuoti užsakovo poreikius į technines charakteristikas ir specifikacijas.
3. Sukurti ir pristatyti kokybišką produktą, kuris būtų orientuotas ir patenkintų užsakovo lūkesčius.

Nors šis metodas pakankamai paprastas, tačiau numato išsamius rezultatus. Pagrindiniai KFI metodo taikymo privalumai išskiriami:

1. Didžiausias privalumas, kad beveik 90 % pakeitimų produkto kūrimo etape yra padaroma ankstyvame projektavimo etape, t. y. prieš produkto gamybą ir pateikimą rinkai – tai apsaugo nuo didesnių nuostolių ir išlaidų.
2. KFI leidžia sumažinti išlaidas ir laiką nustatant prioritetines dizaino charakteristikas, pristatant produktą rinkai.
3. KFI orientuotas į užsakovo lūkesčius, o ne tik į dizaino parametrus. (Bernal *et al.* 2009).
4. Leidžia sudaryti komandinio darbo aplinką, kas svarbu ir integruotam pastato projektavimui.
5. Struktūrizuota informacija.

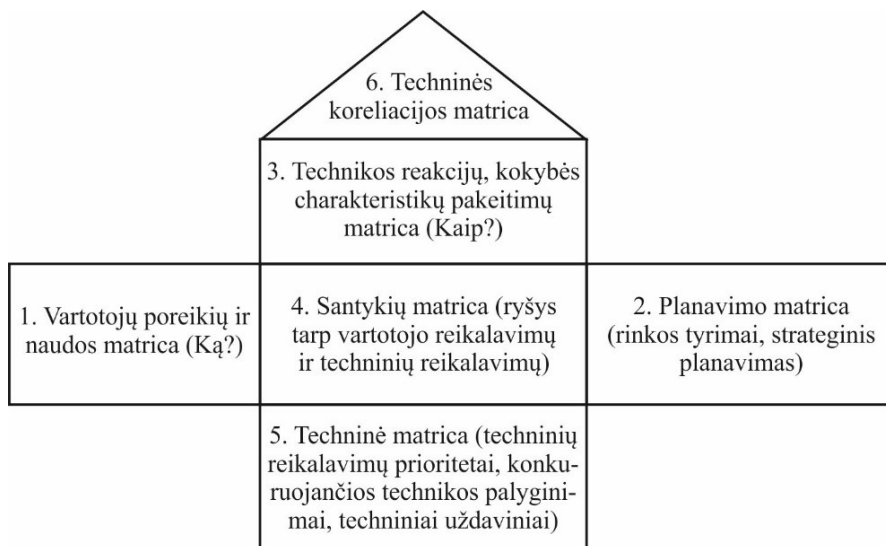
KFI metodas yra sudarytas iš keleto etapų, kurie pereina vienas iš kito. Kiekviename etape yra sudaroma ryšių matrica, pavaizduota 2.4 paveiksle.

Santykių matricos užtikrina, kad kiekvienas užsakovo reikalavimas atsispindėtų atskiru projektiniu (dizaino) elementu, kuris dizaineriams/projektuotojams leistų geriau suprasti svarbiausius projektavimo elementus. Siekiant užtikrinti tinkamą koreliacijos matricų procedūrą ir pavaizduoti tai grafiškai, matrica virsta į KFI namą.



**2.4 pav.** Kokybės funkcijos išskleidimo ryšių matrica (Burge 2007)  
**Fig. 2.4.** Relation matrix of Quality Function Deployment (Burge 2007)

Kokybės funkcijos išskleidimo namais vadinama matricinė diagrama, kurios tikslas yra susieti užsakovo reikalavimus su išmatuojamomis produkto charakteristikomis. Tradicinis KFI namas susideda iš 2.5 paveiksle pavaizduotų matricių (Leleikienė 2015).



**2.5 pav.** Kokybės funkcijos išskleidimo namo dedamosios (Leleikienė 2015)  
**Fig. 2.5.** The components of House of Quality (Leleikienė 2015)



Pirmoji – viena svarbiausių – vartotojų poreikių ir naudos matrica, nes iš jos formuojamos kitos. Joje atsispindi užsakovų lūkesčiai ir pagrindiniai kriterijai. Tai sudėtingas etapas norint teisingai perprasti ir toliau formuoti projekto kriterijus. Bendravimui naudojamos apklausos, interviu ir pan.

Antroji – planavimo matrica. Ši matrica apima 3 svarbius informacijos tipus:

- 1) kiekybinius rinkos duomenis, rodančius vartotojų poreikių svarbumą ir jų patenkinimo lygį, kurį vartotojas pasiekia, naudodamas konkrečios organizacijos ir konkurentų siūlomus produktus;
- 2) kuriamų produktų strateginius tikslus;
- 3) vartotojų poreikių reikšmingumo apskaičiavimą (Leleikienė 2015).

Ši matrica atspindi užsakovo kriterijų reikšmingumą, jų naudingumą esamų produktų kontekste, siektinas reikšmes, palengvina strateginį planavimą.

Trečioji – kokybės charakteristikų pakeitimo matrica. Tai inžinerinių savybių matrica, kurioje atsispindi pirmosios matricos („Ką?“) charakteristikų formavimas į technines-kiekybines charakteristikas („Kaip?“).

Ketvirtoji – santykių matrica – užima didžiąją dalį KFI namo. Tai standartinė dvidimensė matrica, iš kurios toliau identifikuojama, kurie užsakovo kriterijų ir techninių charakteristikų savitarpio ryšiai yra svarbesni, kurie mažiau svarbūs.

Penktoji – techninė matrica – tai finalinė KFI namo matrica, apibendrinanti išvadas apie visus matricos duomenis. Dažniausiai susideda iš 3 dalių.

Techninių prioritetų – kiekvieno techninio rodiklio (reikalavimo) svarbą prieš užsakovo nurodytus reikalavimus. Tarpusavio ryšys nusakomas dauginant, o vėliau sumuojant reikšmes iš planavimo ir santykių matricių.

Konkurencinių palyginimų – techniniai reikalavimai (kriterijai), kurie buvo identifikuoti kaip svarbūs, palyginami su arba gamybos įmonės turimais tokio produkto parametrais arba konkurenciniais. Taip matoma santykinė techninė produkto pozicija bendrame kontekste.

Tikslų – finalinis žingsnis, kuriame apibrėžiamos siektinos produkto kriterijų vertės. Šios matricos sudarymas leidžia šiuos tikslus nustatyti ir reitinguoti, gerai suprantant užsakovo reikalavimus ir įmonės veiklą.

Šeštoji – techninės koreliacijos matrica – „trikampė stogo“ matrica, skirta identifikuoti, ar techniniai kriterijai, reikalavimai (3-ia matrica), kurie apibūdina produktą, pagerina ar apsunkina vienas kitą. Lyginant kiekvieną šios matricos kriterijų porą, keliamas klausimas: ar vieno kriterijaus pagerėjimas pagerina ar pablogina kitą? Jei atsakymas yra, kad vis dėlto vieno kriterijaus pagerėjimas lėmė kito kriterijaus pablogėjimą, reikalingas kompromisas, ar matricioje turi įrašyti ženklą „–“, priešingu atveju (lemiant pagerėjimą) – rašomas „+“. Skirtingo lygio teigiamos ar neigiamos sąveikos gali būti vaizduojamos ir skirtingomis spalvomis.

### 2.2.2. Aksiomatinio projektavimo metodas

Pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmo trečiojo žingsnio vykdymo esmine priemone tampa aksiomatinis projektavimas ir šio metodo principų taikymas. Technologijoje numatyta, kad šis žingsnis susideda iš dviejų dalių – 3-iojo ir 5-o (a, b) žingsnių.

Trečiajame žingsnyje svarbiausiu tampa hierarchijos kūrimas zigzaginiu gretinimo principu. Čia pereinama į fizinę duomenų sritį, tad sudaromos numatytų funkcinių reikalavimų – dizaino parametrų hierarchinės schemos. Funkcinių reikalavimų hierarchinės schemos atspindi ir iki žemiausio lygmens detalizuoja projekto pradžioje užduotus reikalavimus projektui. O numatomi dizaino parametrai atspindi priemonės kiekvieno šių funkcinių reikalavimų išpildymui, t. y. dizaino parametrai, kurių pagrindu sudaroma pastato koncepcijos vizija.

5-asis žingsnis yra skirtas priimti sprendimus turint dvi galimybes: kai norima išrinkti tiesiog geriausią alternatyvą (5 (c) žingsnis) arba norima rasti alternatyvą/sprendinį, artimiausią užduotai skaitinei reikšmei. Tokiu atveju taikoma aksiomatinio projektavimo informacijos aksioma (5 (a, b) žingsniai).

Toliau detaliau pristatomas aksiomatinis projektavimas ir šio metodo principai.

Aksiomatinis projektavimas (AP) – tai dizaino/kūrimo metodika, plačiai naudojama mechanikos inžinerijoje. Metode naudojamos sistemos matricos siekiant sistemškai išanalizuoti ir užsakovo reikalavimus transformuoti į funkcinius reikalavimus, projektinius parametrus ir proceso kintamuosius.

AP teorija buvo sukurta japonų inžinieriaus Nam Pyo Suh ir pritaikyta mechanikos inžinerijoje dvidešimto amžiaus septintajame dešimtmetyje, tačiau mokslinį pagrindą įgijo kiek vėliau. AP teorija buvo naudojama kuriant programinę, techninę įrangą, mašinas, gamybos produktų sistemoje. Dizaineriams tai tapo racionalaus ir loginio mąstymo kūrimo priemonė (Suh 2003b).

AP padeda dizaineriams spręsti dizaino problemas, įveikti tam tikrus dizaino apribojimus ir naudojant AP matricų analizę, pateikia idealų sprendinį. AP susideda iš keleto dedamųjų: duomenų sritys, lygiagretus zigzaginiis gretinimas ir dvi aksiomos – nepriklausomybės ir informacijos. Teigiama, kad geras produkto dizainas/projektas turi tenkinti šias abi aksiomas (Park 2007).

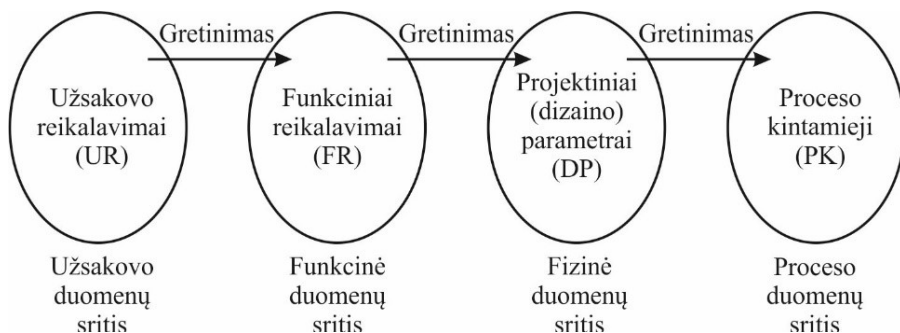
Aksiomatinio projektavimo metodas aprašomas pagal (Suh 2003b) 2.1 lentelę.

**2.1 lentelė.** Aksiominio projektavimo elementai (Suh 2003b)**Table 2.1.** The elements of Axiomatic Design (Suh 2003b)

Elementas	Komponentas	Detalės	Pastabos
Aksimos	Didinti nepriklausomybę	Atskiri funkciniai elementai	Numato reguliavimą ir kontrolę
	Mažinti informaciją	Maksimali tikimybinė sėkmė	Suteikia išsamumą ir pelną
Struktūra	Horizontali	Dizaino duomenų sritis	
	Vertikali	Hierarchijos duomenų srityse	Išsiskirstymas nuo bendrumo iki konkretumo
Procesai	Lygiagretus gretinimas	Tarp funkcinio ir fizinių duomenų sričių	Vertikalios hierarchijos generavimas
	Fizinė integracija	Pertvarkymas	Konstruktinius į fizinius parametrus

Lygiagretus gretinimas leidžia problemas išskaidyti į mažesnes dalis, tada lengviau jas perprasti bei pasirinkti projekcinį sprendinį kiekvienai jų sukuriant tarpusavio ryšius tarp to, kas turi būti pasiekta ir kaip. AP numato priemones objektyviai pasirinkti geriausią projektavimo sprendinį ir jį palyginti su etaloniniais sprendiniais (Towner 2013).

Kaip matyti 2.6 paveiksle, projektavimas susideda iš keturių sričių: užsakovo duomenų srities, funkcinio duomenų, fizinių duomenų sričių ir proceso srities.

**2.6 pav.** Projektavimo eiga gretinant duomenų sritis (Suh 2003; Pereira 2011)**Fig. 2.6.** The design process as a mapping through domains (Suh 2003; Pereira 2011)

Funkcinė duomenų sritis, nurodanti „ką mes norime pasiekti“ yra stipriai susijusi su fizine duomenų sritimi– ji pasiūlo projektinį (dizaino) sprendinį, kaip patenkinti reikalavimus. Produkto dizainas prasideda užsakovo duomenų srityje, kur identifikuojami pagrindiniai užsakovo poreikiai/lūkesčiai (ar produkto pagrindinės savybės) UR ir apribojimai ( $A_P$ ). Kadangi šie lūkesčiai dažnai būna išreiškiami buitiškai, siekiama transformuoti juos į technines charakteristikas išreikšiant *funkciniais reikalavimais* FR, nurodančius *Ką reikia pasiekti?*, esančiais funkcinėje duomenų srityje. Tai turėtų būti daroma labai neutraliomis sąlygomis, t.y. negalvojant apie jau egzistuojančius produktus. Kitaip tariant, funkciniai reikalavimai – tai minimalus nepriklausomų reikalavimų rinkinys, kuris visiškai charakterizuoja funkcinis produkto poreikius funkcinį duomenų srityje. Jų charakteristikos pateiktos 2.2 lentelėje.

**2.2 lentelė.** Aksiominio projektavimo duomenų sritys (Brown 2005)

**Table 2.2.** Data fields of Axiomatic Design (Brown 2005)

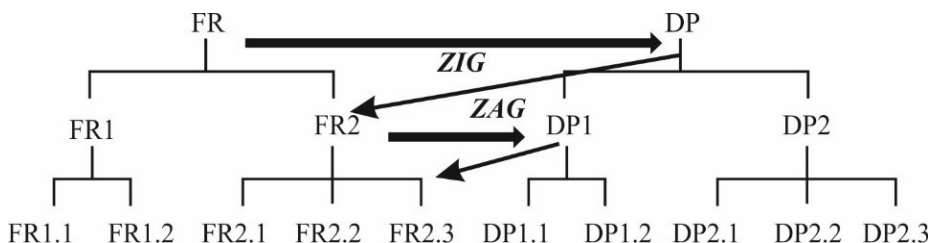
Funkciniai reikalavimai, FR	Dizaino (projektiniai) parametrai, DP	Apribojimai $A_P$ , (kaina, laikas, svoris)
Sąrašas „ką?“ yra tikimasi iš dizaino	Sąrašas „kaip“ turėtų atrodyti	„Ką“ turėtų atitikti
Prasideda veiksmazodžiu	Prasideda daiktavardžiu	
Tenkina užsakovo lūkesčius	Tenkina užsakovo lūkesčius	Apibrėžia ribas
Nepriklausomi nuo kitų FR	Pasirinktas kiekvienam FR-ui atskirai	Gali būti siejamas su keletu FR
Turi leistiną nuokrypį	Turi fizinį nuokrypį	Turi ribas
Reikalauja DP		Neturi DP

Siekiant įgyvendinti numatytus FR, kiekvienam jų turi būti suprojektuotas atitinkamas dizaino parametras (DP) fizinėje duomenų srityje. DP atspindi realius projektinius parametrus (projektuojami tam tikri sprendiniai, diegiamos numatytos priemonės), kad būtų galima išpildyti FR. Kuriamas procesas pagal DP charakterizuojamas proceso kintamaisiais Proceso srityje.

Hierarchijos kūrimas yra vienas iš trijų svarbiausių etapų aksiomatiniame projektavime. Dizaineris pasirenka dizaino sprendinį skaidant aukščiausio lygio FR-us į žemesnio lygio FR-us. Tai gali būti daroma tik tada, kai aukščiausio lygmens dizaino parametrai DP parinkti. Skaidymo procesas vyksta kiekviename lygmenyje iki galutinio sprendinio. Šio skaidymo proceso metu dizaineris sukuria FR-ų, DP-ų ir proceso kintamųjų hierarchijas.

Dizaino (projektinių) parametrų matrica yra kuriama sugretinant funkcinius reikalavimus FR su dizaino (projektiniais) parametrais DP (2.7 pav.), arba kitaip tariant – kiekvienam FR priskiriant tinkamą DP. Pirmiausia nustatomi aukščiausio lygmens DP bei sugretinami su aukščiausio lygmens FR. Vėliau kuriami žemesnio lygmens FR ir DP. Šis procesas tęsiamas iki kol sistema pakankamai išskaidoma tolesniam dizainerio/projektuotojo darbui.

Nors sugretinimo „vienas su daugeliu“ proceso metu funkciniui reikalavimui FR galimas daugiau nei vienas tinkamas projektinis parametras DP, turime pasirinkti vieną DP, ir būti tikri, kad jis nelems kitų funkcinių reikalavimų, o šie bus tenkinami savo ribose. AP metu koncepcinio sprendinio forma jau turėtų gimti dizainerio galvoje šių žingsnių metu. Sugretinimo procesas yra vaizduojamas dizaino matrica, kuri parodo ryšius tarp FR-ų ir DP-ų bei tarp DP-ų ir proceso kintamųjų. Pavyzdinė matrica pavaizduota 2.3 lentelėje.



**2.7 pav.** Funkcinių reikalavimų gretinimas su projektiniais (dizaino) parametrais siekiant sukurti jų hierarchijas (Suh 2003)

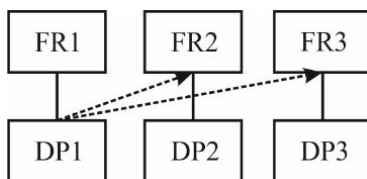
**Fig. 2.7.** Zigzagging to decompose the hierarchies of functional requirements and design parameters (Suh 2003)

**2.3 lentelė.** Funkcinių reikalavimų ir projektinių (dizaino) parametrų ryšių matrica

**Table 2.3.** Relation matrix of functional requirements and design parameters

Komponentas	DP1	DP2	DP3
FR1	X	0	0
FR2	X	X	0
FR3	X	0	X

2.3 lentelėje „X“ arba „0“ ženklai parodo, ar DP stulpelis lemia FR eilutę. Esame pavyzdyje DP1 lemia visus funkcinius reikalavimus (su ženklu X), o DP2 lemia tik antrąjį funkcinį reikalavimą. Grafinė šios matricos išraiška pateikta 2.8 pav. Rodyklės jame atspindi „X“ priklausomybę.



**2.8 pav.** Grafinis dizaino matricos pristatymas

**Fig. 2.8.** Graphical representation of the design matrix

FR iš funkcinių duomenų srities sugretinimo į fizinių duomenų sritį proceso metu reikia priimti tinkamą dizaino sprendinį naudojantis nepriklausomybės aksioma. Jei egzistuoja keli sprendiniai, tenkinantys nepriklausomybės aksiomą, tada sprendinys parenkamas pagal informacijos aksiomą.

Kai tik vienas FR tenkinamas prie tam tikro DP, tada nepriklausomybės aksioma automatiškai tenkinama, tad pasirinkimas lemiamas tik informacijos aksiomos tenkinimu.

Nepriklausomybės aksioma teigia, kad funkcinių reikalavimų FR nepriklausomybė turi būti visada tenkinama.

Informacijos aksioma teigia, kad tarp visų projektinių (dizaino) sprendinių, tenkinančių pirmąją – nepriklausomybės aksiomą – kaip tinkamas sprendinys išrenkamas tas, kuris turi mažiausią informacijos kiekį. Kadangi aksioma apibrėžiama tikimybe, tad geriausias sprendinys turi didžiausią tikimybę reikšmę.

Funkcinių reikalavimų rinkinys atspindi finalinio dizaino tikslus. Esant keliems FR, nepriklausomybės aksioma lemia dizaino sprendinį, kai kiekvienas FR yra tenkinamas nelemdamas vienas kito. Tai reiškia, kad turi būti parinkti tokie DP, kurie tenkintų tiek pačius FR, tiek išlaikytų jų nepriklausomybę.

Nustačius FR, vyksta sugretinimo procesas, t. y. perėjimas iš „Ką?“ duomenų srities į „Kaip?“. Šis sugretinimas gali būti išreiškiamas matematiškai.

Santykis tarp funkcinių reikalavimų FR ir projektinių parametrų DP vektorių nusakomas formule (Suh 2003):

$$\{FR\} = [A]\{DP\}, \quad (2.1)$$

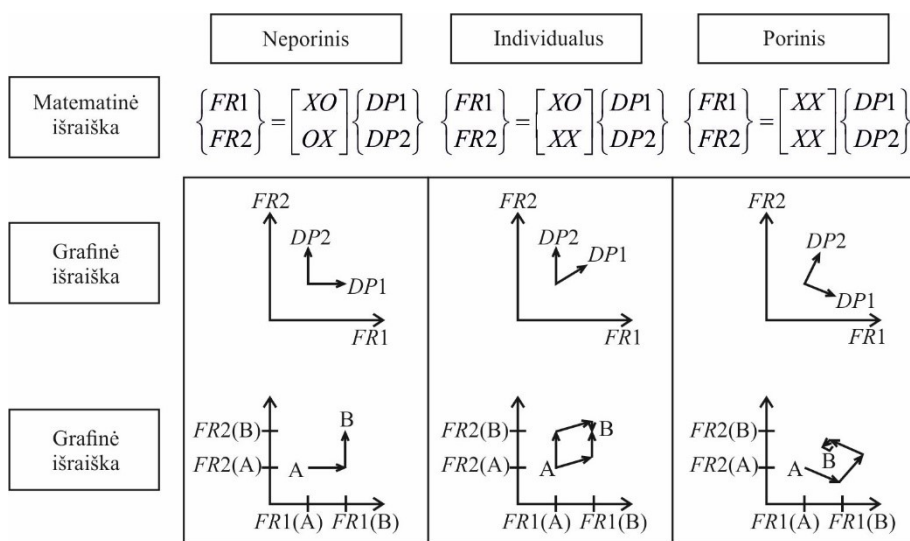
čia  $A$  – vadinama projektavimo/dizaino matrica.

Žemiau pateikta produkto dizaino matrica, 3-ims FR-ams.

$$[A] = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Norint patenkinti nepriklausomybės aksiomą, dizaino (projektinių) parametrų matrica turėtų būti arba įstriža arba trikampės formos. Kai dizaino matrica įstriža – kiekvienas FR-as gali būti nepriklausomai patenkinamas tam tikru vienu dizaino (projektiniu) parametru DP. Tai vadinama neporiniu dizainu. Jei matrica yra trikampė, tai reiškia, kad funkciniai reikalavimai bus patenkinami tik tada, kai Projektiniai parametrai bus sudėlioti tinkama eilės tvarka. Tai vadinama individualiu dizainu. Visos kitos matricos formos lemia „pilną matricą“ ir porinį dizainą. Tinkama, sprendžiama matrica šiuo atveju gali būti tik įstriža arba trikampė.

Matematinė ir grafinė išraiškos pateiktos 2.9 paveiksle.



**2.9 pav.** Projektavimo matricų grafinė ir matematinė išraiška (System design 2018)

**Fig. 2.9.** Graphical and mathematical representation of the design matrixes (System design 2018)

Net ir turint vienodą užsakovo užduotį pagal FR, visgi skirtingi architektai ar dizaineriai sukurs skirtingus dizaino sprendinius, kurie tenkins nepriklausomybės aksiomą. Tačiau tik vienas dizaino sprendinys gali būti geriausias.

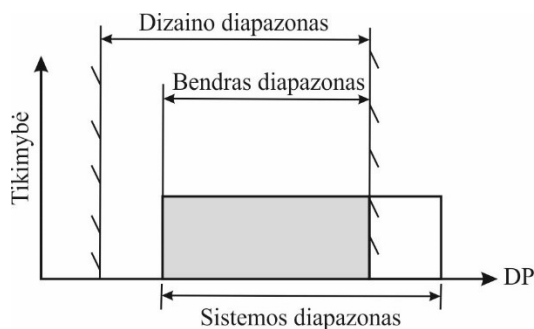
Informacijos aksioma suteikia galimybę įvertinti visų galimų (tenkinančių nepriklausomybės aksiomą) dizaino sprendinių tinkamumą kiekybiškai. Be to, ji suteikia teorinį pagrindą optimizuoti dizainą. Informacijos aksioma teigia, kad sprendinys su didžiausia tikimybine reikšme gali būti traktuojamas kaip geriausias

sprendinys (Suh 2003). Informacijos turinys  $I$  yra nustatomas kiekvienam reikalavimui (savybei), kur  $p$  yra patikimumo reikšmė, tikslo tenkinimui. Tada šios tikimybės sumuojamos tam tikro DP visuose lygmenyse.

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P_i} = -\log_2 P_i. \quad (2.3)$$

Sprendinys, turintis mažiausią  $I$  reikšmę, yra geriausias sprendinys, nes jam reikalingas mažiausias informacijos turinys pasiekti norimą dizainą. Kai visų sprendinių tikimybinės reikšmės lygios 1,0, tai informacijos turinio reikšmė lygi 0 ir atvirkščiai. Taigi, jei tikimybinė reikšmė labai maža, reikalinga papildoma informacija, kad būtų galima patenkinti funkcinius reikalavimus.

Kai DP lemia daugiau nei vieną FR – atsiranda galimas FR nuokrypis. FR nuokrypiai yra apibrėžti tam tikrame projektavimo diapazone, kuris lemia galutinio sprendinio kokybę. Tam apskaičiuojamas informacijos turinys (2.10 pav.).



**2.10 pav.** Tikimybinės funkcijos grafinė išraiška (Suh 2003a)

**Fig. 2.10.** Graphical representation of probability function (Suh 2003a)

$$P_{FR1} = \frac{\text{bendras} - \text{diapazonas}}{\text{sistemos} - \text{diapazonas}}, \quad (2.4)$$

$$I_{FR1} = \log \frac{\text{sistemos} - \text{diapazonas}}{\text{bendras} - \text{diapazonas}}. \quad (2.5)$$

Kulak *et al.* (2010) atliko aksiomatinio projektavimo pritaikymo sričių apžvalgą kurioje matyti, kokiose srityse šis projektavimo metodas naudojamas bei kiek iki galo jis išpildomas. Matyti, kad dažniausiai šis metodas pritaikomas ir detalizuojama tik pirmoji – nepriklausomybės aksioma, kuri užtikrina, kad kiekvienas funkcinis reikalavimas turi jį išpildantį projektinį parametą, kuris nelemia (arba lemia leistina tvarka) kitų funkcinių reikalavimų. Antroji –



informacijos aksioma, pritaikoma ne visada dėl savo specifinių pritaikymo aplinkybių, t. y., kai norima pasiekti ne geriausią rezultatą, o žinant labai konkrečias jų ribas ir vertes. Todėl literatūroje labai dažnai šis metodas pritaikomas naudojant tik pirmąją aksiomą.

### **2.2.3. Modifikuotas kokybės funkcijos išskleidimo namo metodas**

Nors KFI yra standartinė metodika, tačiau norint ją sujungti ir toliau naudoti kartu su aksiomatinio projektavimu, nuspręsta toliau adaptuoti (Gilbert, Omar 2014) modifikuotą KFI metodiką.

Pagrindiniai skirtumai atsiranda KFI namo – Technikos reakcijų, kokybės charakteristikų pakeitimų matricoje. Čia atsispindi ne tik suformuotos techninės-kiekybinės charakteristikos, tačiau jos turėtų būti suformuotos į tris grupes: Apribojimus, nefunkcinius reikalavimus nFR, funkcinius reikalavimus FR. Funkciniai reikalavimai yra iš antrinio skaidymo lygmens. Pastato „stogas“ kaip ir tradiciniame KFI name nurodo kryptį ir sąsajas.

Pateikta informacija toliau bus naudojama aksiomatinio projektavimo dalyje. KFI namo „stoge“ esanti informacija projektuotojui padeda lengvai susidaryti vaizdą apie apribojimus ir nefunkcinius reikalavimus, kurie lems funkcinių reikalavimų skaidymą gretinimo procese. Vertindamas šią informaciją, dizaineris ar projektuotojas gali iškart matyti ir įvertinti svarbiausias kliento sritis ir ten sutelkti didžiausią dėmesį. Kai KFI namas užpildytas, pereinama prie aksiomatinio projektavimo.

### **2.2.4. Siūlomų naudotų energinio modeliavimo ir projektavimo programų sąsajų formatai**

Ketvirtas pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmo žingsnis yra skirtas projektavimui (architektūra ir modeliavimas) bei numatytų kriterijų reikšmių nustatymui. Priklausomai nuo užduotų reikalavimų, numatytos skirtingos priemonės gauti reikiamų rodiklių reikšmes – Revit, DesignBuilder (DB), SimaPro.

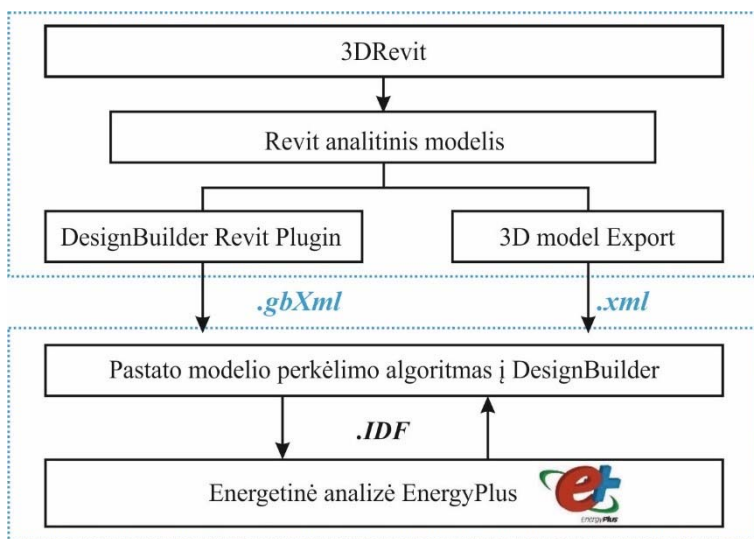
Algoritme numatyta, kad siekiant atlikti sukurto architektūrinio modelio energinį modeliavimą, galimas automatinis pastato modelio transportavimas iš programos Revit. Naudojant kitus įrankius kurti pastato architektūrinį modelį, ar nesukuriant taisyklų analitinio modelio, galimos kitos galimybės. Todėl čia pristatomos architektūrinio modelio perkėlimo galimybės ir programų sąsajų formatai.

Green Building XML schema, vadinama „gbXML“ palengvina duomenų perdavimą tarp pastato informacinio modelio – kaip įvesties duomenys į DB. Pagrindinė XML kalbos paskirtis yra užtikrinti lengvesnį duomenų keitimąsi tarp

skirtingo tipo sistemų. Šis požiūris leidžia architektams sutelkti dėmesį į jų pagrindinę veiklą. Tai leidžia importuoti tokius 3D modelius, sukurtus tokiais įrankiais kaip Autodesk, Graphisoft, and Bentley. Kad pačiu paprasčiausiu būdu būtų galima nustatyti pastato energinį efektyvumą, įrangos galią, aplinkosauginius parametrus ir t. t., gbXML tapo standartine pramonės sektoriaus bendradarbiavimo schema, kuri žymiai supaprastina informacinių modelių kūrimą ir analizę.

Suprojektavus 3D modelį, jis perkeliamas paprasčiau. Siekiant iš Revit perkelti modelį į DesignBuilder, yra du būdai (2.11 pav.):

1. naudojantis tiesioginiu DesignBuilder Revit įskiepiu.
2. naudojantis Revit gbXML eksportavimo funkcija.



**2.11 pav.** Pastato modelio kūrimo ir analizės duomenų srautų formatai

**Fig. 2.11.** Data formats for building modeling and analysis

Bet kokių atveju, Revit turi būti sukuriamas analitinis modelis, kuris jau vėliau gali būti perkeliamas ir analizuojamas DesignBuilder. DesignBuilder yra EnergyPlus programos sąsaja, tad energinės analizės skaičiavimai atliekami būtent joje. Duomenų transportavimui tarp DesignBuilder ir EnergyPlus importuoti .IDF formatu.

### 2.2.5. Daugiakriteris sprendimų priėmimo metodas COPRAS

5-asis algoritme numatytas žingsnis – tai sprendimų priėmimas. 5-as (a, b) žingsniai yra skirti alternatyvių sprendinių vertinimui ir sprendimų priėmimui remiantis aksiomatinio projektavimo informacijos aksioma. 5-ame (c) žingsnyje numatyta, kad esant keletui galimų sprendinių, geriausia jų gali būti išrinkta taikant daugiakriterį sprendimų priėmimo metodą COPRAS. Žinant svarbiausius projekto pradžioje identifikuotus kriterijus ir jų reikšmingumus (čia svarbiausias vaidmuo tenka užsakovui, o proceso vykdymui – projekto konsultantas), tinkamiausia alternatyva gali būti išrinkta naudojant daugiakriterį sprendimų priėmimo metodą.

Siekiant surasti geriausią sprendinį, vertinant jį pagal daugelį kriterijų, siūloma taikyti sprendimų priėmimo metodą COPRAS (Zavadskas ir Kaklauskas 1996).

1-ajame etape sudaroma įvertinta normalizuota sprendimų priėmimo matrica. Šio etapo tikslas – iš lyginamų rodiklių gauti bedimensinius (normalizuotus) įvertintus dydžius. Žinant bedimensius įvertintus dydžius, galima palyginti visus skirtingų matavimo vienetų rodiklius. Tam taikoma tokia formulė:

$$d_{ij} = \frac{x_{ij}q_i}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.6)$$

čia  $x_{ij}$  –  $i$  kriterijaus reikšmė  $j$  sprendimo variante;  $m$  – kriterijų skaičius;  $n$  – lyginamų variantų skaičius;  $q_i$  –  $i$  kriterijaus reikšmingumas.

Kiekvieno kriterijaus  $x_i$  gautų bedimensinių įvertintų reikšmių  $d_{ij}$  suma visada lygi šio kriterijaus reikšmingumui  $q_i$ :

$$q_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (2.7)$$

Kitaip sakant, nagrinėjamo kriterijaus reikšmingumo  $q_i$  reikšmė proporcingai paskirstoma visiems alternatyviems variantams  $a_j$ , atsižvelgiant į jų reikšmes  $x_{ij}$ .

2-ajame etape apskaičiuojamos  $j$  variantą apibūdinančių minimizuojančių (jų mažesnė reikšmė yra geresnė (renovacijos kaina, medžiagų kenksmingumo sveikatai lygis))  $S_{-j}$  ir maksimizuojančių (jų didesnė reikšmė yra geresnė (konstrukcijų garso izoliavimo lygis, estetika))  $S_{+j}$  įvertintų normalizuotų rodiklių sumos. Jos apskaičiuojamos pagal formulę:

$$S_{+j} = \sum_{i=1}^m d_{+ij}, \quad S_{-j} = \sum_{i=1}^m d_{-ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (2.8)$$

Šiuo atveju  $S_{+j}$  (juo didesnis šis dydis („plusai“), tuo labiau įgyvendinti suinteresuotų grupių tikslai) ir  $S_{-j}$  (kuo mažesnis šis dydis („minusai“), tuo labiau pasiekti suinteresuotų grupių pasiektų tikslų laipsnį. Bet kuriuo atveju visų objektų „plusų“  $S_{+j}$  ir „minusų“  $S_{-j}$  sumos visada yra atitinkamai lygios visoms maksimizuojančių ir minimizuojančių kriterijų reikšmingumų sumoms:

$$S_{+} = \sum_{j=1}^n S_{+j} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{+ij}, \quad S_{-} = \sum_{j=1}^n S_{-j} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{-ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (2.9)$$

Taip dar kartą galima patikrinti atliktų skaičiavimų teisingumą.

3-iajame etape lyginamų variantų santykinis reikšmingumas (efektyvumas) nustatomas remiantis juos apibūdinančiomis teigiamomis (renovacijos „plusais“)  $S_{+j}$  ir neigiamomis (renovacijos „minusais“)  $S_{-j}$  savybėmis. Kiekvienos alternatyvos  $a_j$  santykinis reikšmingumas  $Q_j$  nustatomas pagal formulę:

$$Q_j = S_{+j} + \frac{S_{-\min} \cdot \sum_{j=1}^m S_{-j}}{S_{-j} \cdot \sum_{j=1}^m \frac{S_{-\min}}{S_{-j}}}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (2.10)$$

4-ajame etape nustatomas objektų prioritetiškumas. Kuo didesnis  $Q_j$ , tuo variančio efektyvumas (prioritetiškumas) yra didesnis.

## 2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudarytas pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmas, integruojantis šiuolaikines projektavimo, modeliavimo priemones bei bendrojoje inžinerijoje žinomus kokybės funkcijos išskleidimo ir aksiomatinio projektavimo metodus. Algoritmas sumažina tradicinio projektavimo trūkumus ir jau nuo pirmojo projekto etapo sujungia IPP komandą bei užtikrina užsakovo lūkesčius ir reikalavimus maksimaliai atitinkantį sprendinį.
2. Parinkta ir pastato darnaus sprendinio paieškos algoritme pritaikyta DesignBuilder energinio modeliavimo priemonė, kuri jau ankstyvojoje projektavimo stadijoje leidžia įvertinti galimų architektūrinių-konstruktūrinių sprendinių efektyvumą ir energinį funkcionalumą.
3. KFI namo metodo taikymas leidžia nustatyti visus IPP komandos ir užsakovo lūkesčius, juos suderinti ir nustatyti kiekvieno jų svarbą. Pirminiai lūkesčiai transformuojami į inžinerines technines charakteristikas – funkcinius reikalavimus, nustatoma jų tarpusavio koreliacija. Tai palengvina

galimų sprendinių pasirinkimus tolesniuose dizaino (projektinių) parametų detalizavimo etapuose.

4. Aksiominio projektavimo etape sudaromos funkcinių reikalavimų ir dizaino parametų hierarchinės schemos leidžia tiksliai apibrėžti projekto tikslus, o kartu ir konkrečias priemones jiems įgyvendinti. Algoritme taikoma aksiominio projektavimo nepriklausomybės aksioma sąlygoja visų suformuluotų funkcinių reikalavimų įgyvendinimą.
5. Pasirinktas ir technologijoje integruotas sprendimų priėmimo metodas COPRAS kartu su aksiominio projektavimo informacijos aksioma sudaro platesnes sąlygas tikslesniam sprendimų priėmimo procesui.
6. Konceptijos modeliavimo etape kartu naudojami skaitmeninis projektavimas ir energinio modeliavimo priemonės bei pastato gyvavimo ciklo analizė užtikrina produktyvų ir tikslų projektavimą bei išgrynintą energetinį požiūrį ankstyvojoje projektavimo stadijoje.



---

## **Siūlomos pastato koncepcijos rengimo technologijos taikymas energinio funkcionalumo vertinimui**

Šiame skyriuje pademonstruotas siūlomos pastato koncepcijos rengimo technologijos (pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmo) taikymas energinio funkcionalumo vertinimui bei palyginimas su įvykdytu realiu tradiciniu projektavimo procesu. Siekiama išsiaiškinti šių dviejų projektavimo procesų bei gautų rezultatų efektyvumą. Atlikta analizė, kaip technologijos taikymas lemia galutinį rezultatą – į pirminius reikalavimus orientuotą pastato sprendinį, projektą.

Tolesniuose žingsniuose siekiant pademonstruoti tik siūlomos technologijos veiksnumą, pastato koncepcijos kūrimas bus vykdomas technologijoje numatyta eiga, tačiau analizuojant tik tam tikrus pasirinktus komponentus, t. y. vienas funkcinis reikalavimas bei jam skirti projektiniai parametrai, apimantys architektūrinius sprendinius. Pastatui keliama reikalavimai ir jų reikšmingumai detalizuoti pagal įvykdytos apklausos rezultatus.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autorės straipsnis (Lapinskienė, Martinaitis 2017).

### **3.1. Siūlomos pastato koncepcijos rengimo technologijos taikymo atvejis**

Šiame skyrelyje siekiama pademonstruoti sukurtos pastato koncepcijos rengimo technologijos eigą, naudojamų metodų ir analizės įrankių taikymą. Išdėstyta eiga atitinka pagrindinius 2.2 paveiksle nurodytus žingsnius.

#### **3.1.1. Pradinių duomenų analizė**

Technologijos algoritme numatyta, kad pirmajame žingsnyje turėtų atsispindėti pagrindinė projekto užduotis, pastato ir sklypo normatyviniai, fiziniai ir funkciniai apribojimai. Šiuo atveju pagrindinė užduotis buvo suprojektuoti administracinį, atviro tipo maždaug 2000 m<sup>2</sup> pastatą, kurio apvalkalo charakteristikos atitiktų A+ klasę.

#### **3.1.2. Pastatui keliamų reikalavimų identifikavimas taikant kokybės funkcijos išskleidimo namo metodą**

Antrojo technologijos algoritme numatyto žingsnio tikslas – identifikuoti užsakovo ir IPP komandos lūkesčius ir poreikius, transformuoti juos į techninius reikalavimus.

Šis procesas vykdomas pasitelkiant anketinę apklausą, kurią parengia ir apdoroja projekto konsultantas. Visos projekte dalyvaujančios grupės įvardija savo projektui keliamus reikalavimus, tačiau užsakovas turi teisę juos išreitinguoti pagal svarbą. Kadangi kliento ir komandos išreikšti reikalavimai išsakomi buitine kalba, projekto konsultantas transformuoja juos į techninius reikalavimus (funkcinius, nefunkcinius bei apribojimus). Atvejo analizėje panaudoti literatūroje ir apklausos metu surinkti duomenys, o pats procesas įvykdytas remiantis autorės ir architekto bendradarbiavimu.

Funkciniai reikalavimai – bet kokie reikalavimai, kurie nurodo, ką sistema turi daryti. Kitaip sakant, nurodomas tam tikras sistemos elgesys prie tam tikrų sąlygų. Nefunkciniai reikalavimai – bet koks reikalavimas, kuris parodo kaip sistema atlieka savo funkciją arba kokie yra funkcionalumo apribojimai. Apribojimai čia dažniausiai susiję su tam tikrais projektavimo reglamentų reikalavimais bei užsakovo finansiniais apribojimais. Tolesniuose žingsniuose detalizuojami tik aukščiausio lygmens funkciniai reikalavimai.

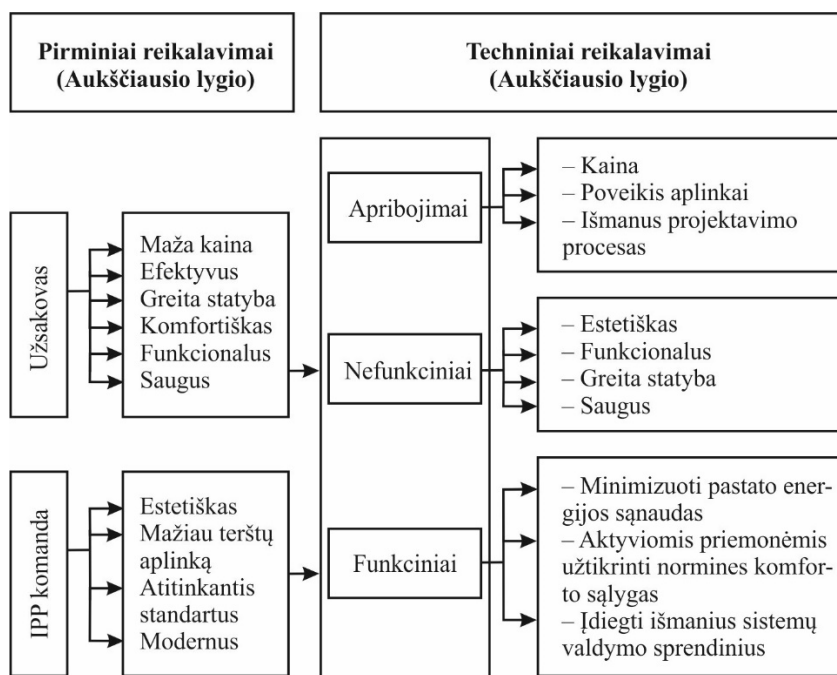
3.1 lentelėje matyti, kad pateikta 10 užsakovo ir IPP komandos aukščiausio lygmens reikalavimų, kurie detalizuoti į žemesniojo lygio reikalavimus ir identifikuota kiekvieno jų svarba. Šioje atvejo analizėje reikalavimai autorės sudaryti pagal atliktą apklausą bei remiantis literatūros šaltiniais.



**3.1 lentelė.** Pirminiai užsakovo ir integruoto pastato projektavimo komandos lūkesčiai ir jų svarba

**Table 3.1.** Initial customers' and Integrated Building Design team needs and their importance

Dalyvis	Aukščiausias lygis	Žemesni lygiai	Žemesniojo lygio svarba	Aukščiausio lygio svarba
Užsakovas	Maža kaina	Minimali statybinių medžiagų kaina	10	9,7
		Minimali darbų kaina	10	
		Minimali projektavimo kaina	9	
Užsakovas	Efektyvus	Mažos išlaidos energijai	10	10
		Mažos eksploatacinės išlaidos	10	
Užsakovas	Greita statyba	Greitas projektavimas	7	7,7
		Greiti statybos/surinkimo darbai	8	
		Greitas medžiagų transportavimas	8	
Užsakovas	Komfortiškas	Sveikos komfortiškos sąlygos žmonėms	5	5
Užsakovas	Funkcionalus	Patogus išplanavimas	6	6
Užsakovas	Saugus	Kokybiška, saugi aplinka	6	6
IPP komanda	Patraukli išvaizda	Patrauklus pastato dizainas	7	7
		Patrauklus interjeras	7	
IPP komanda	Mažiau terštą aplinką	Maži CO <sub>2</sub> išsiskyrimai	6	5,5
		Tvarios statybinės medžiagos	5	
IPP komanda	Atitinkantis standartus	Tenkintų reglamentų reikalavimus	6	6
IPP komanda	Modernus	Išmanių technologijų taikymas projektavime	6	6,5
		Taikyti išmanius inžinerinius sprendinius	7	



**3.1 pav.** Pirminių užsakovo ir integruoto pastato projektavimo komandos lūkesčių detalizavimas į aukščiausio lygio techninius reikalavimus

**Fig. 3.1.** The translation of customers and Integrated Building Design team initial expectations to technical requirements

Šie pirminiai reikalavimai, dažnai išsakyti buitiškai, bet siekiant efektyvinti projektavimo procesą, turi būti transformuojami į techninius reikalavimus. Remiantis sukurta technologija – tai projektavimo konsultanto funkcija. 3.1 paveiksle matyti pirminių aukščiausio lygio lūkesčių suskirstymas į apribojimus, funkcinius ir nefunkcinius reikalavimus. Apribojimams dažniausiai priskiriami tokie parametrai kaip kaina (numatytas biudžetas), pagal literatūroje pateikiamas rekomendacijas – poveikio aplinkai kriterijai (dažnai ir jiems turima konkreti reikšmė). Prie nefunkcinių reikalavimų priskiriami reikalavimai, dažnai neturinčios konkrečios skaitinės išraiškos, pvz.: estetiškas, funkcionalus, greita statyba (jei nenurodyta konkreti tikėtina trukmė). Pirminiai reikalavimai priskiriami ir „transformuojami“ kaip funkciniai reikalavimai, atsakantys į klausimą „Ką reikia pasiekti?“. Šiuo atveju užsakovo buitiškai išreiškiamas reikalavimas, kad pastatas būtų „Efektyvus“ – transformuojamas į funkcinį reikalavimą „Minimizuoti pastato energijos sąnaudas“, taip pat ir kaip apribojimas – „Išmanus projektavimo procesas“. Šiuo reikalavimu siekiama, kad būtų vykdomas IPP projektavimas su šiuolaikinėmis projektavimo modeliavimo priemonėmis, kas leistų „patikrinti“ ir optimizuoti sprendinius dar

ankstyvojoje stadijoje. Taip lengviau ir efektyviau bus priimti sprendiniai (architektūriniai, inžineriniai), kad būtų galima minimizuoti pastato energijos sąnaudas.

3.2 lentelėje pristatomi aukščiausio lygmens reikalavimai bei jų skaidymas į žemesnio lygmens reikalavimus. Matyti, kad transformavus pirminius lūkesčius, išsigrynina trys pagrindiniai aukščiausio lygio funkciniai reikalavimai: minimizuoti pastato energijos sąnaudas, aktyviomis priemonėmis užtikrinti normines komforto sąlygas bei taikyti modernius/išmanius inžinerinius sprendinius.

### 3.2 lentelė. Pirminiai projekto reikalavimai

**Table 3.2.** Initial needs of the project

Aukščiausias lygis	Žemesni lygiai
1	2
Apribojimai	
Kaina	Minimali statybinių medžiagų kaina
	Minimali darbų kaina
	Minimali projektavimo kaina
	Mažos priežiūros išlaidos
	Mažos eksploatacinės išlaidos
	Mažos išlaidos per visą gyvavimo ciklą
Poveikis aplinkai	Globalinis atšilimas GW (CO <sub>2</sub> )
	Ozono kiekio mažėjimas (OLD)
Modernus projektavimo procesas	Taikyti išmanius projektavimo įrankius ir metodus
Nefunkciniai reikalavimai	
Estetiškas	–
Funkcionalus	–
Greita statyba	–
Saugus	–
Funkciniai reikalavimai	
Minimizuoti pastato energijos sąnaudas	Minimizuoti pastato šilumos nuostolius

3.2 lentelės pabaiga

1	2
	Kontroliuoti papildomus šilumos pritekįs
	Sumažinti vidinius pritekįs
	Įdiegti išmanius sistemų valdymo sprendinius
Aktyviomis priemonėmis užtikrinti normuojamas komforto sąlygas	Suprojektuoti tinkamas inžinerines sistemas
	Užtikrinti tinkamą sistemų valdymą
Suprojektuoti modernias inžinerines sistemas	Suprojektuoti išmanias inžinerines sistemas ir jų valdymą

Kadangi projektams keliama daugelis reikalavimų, svarbu išsiaiškinti, kurie ne pirminiai, o jau techniniai yra svarbiausi, t. y. labiausiai lemiantys vienas kito atžvilgiu bei kokią įtaką likusiems padarys vieno kriterijaus/reikalavimo pagerinimas. Projekto konsultantas trūkstant žinių, pasitelkia projekto dalyvius per anketinę apklausą, užpildo pirmo ir antrojo lygio kokybės funkcijos išskleidimo namų matricas. Toliau analizė atliekama kokybės funkcijos išskleidimo namo pagrindu. Jos tikslas yra identifikuoti svarbiausią aukščiausio lygio funkcinį reikalavimą ir svarbiausią jo žemesnįjį reikalavimą.

Šioje 1-o lygio KFI pagrindinėje matricoje (3.2 pav.) pateikiama pirminių reikalavimų ir techninių reikalavimų koreliacija, t. y. naudojantis šio metodo principais įvardijamas jų tarpusavio santykis (tvirti, vidutiniai ar visai nelemiantys). Rezultate, kartu su pradiniu užsakovo reikalavimų vertinimu, galima identifikuoti svarbiausią techninį kriterijų.

KFI metodo taikymas leido identifikuoti, kad svarbiausias techninis reikalavimas yra „Kaina“ (26,4 %), nes ne tik užsakovas jį įvardija kaip vieną svarbiausių, tačiau jis labiausiai lemia likusius reikalavimus. Visgi kituose etapuose, įvertinus pirminių reikalavimų ir techninių reikalavimų koreliaciją, detalizuojamas funkcinis reikalavimas „Minimizuoti pastato energijos sąnaudas“ (14,4 %).

KFI namo „stogo“ matricoje parodoma kita inžinieriui/projektuotojui svarbi informacija, t. y., kaip vieno techninio reikalavimo pagerinimas lems (labai pagerins, pagerins, pablogins, labai pablogins ar neturės įtakos) kito reikalavimo reikšmei. Pvz., architektui neturėdamas pakankamai žinių specialiose inžinerinėse srityse galės matyti, kaip jo sprendinys paveiks kitus rodiklius. Tai palengvina projektavimo kriterijų pasirinkimą. Matyti, kad šiuo atveju beveik visų kriterijų gerinimas lems (neigiamai, t. y. didins) vieną kriterijų – „Kainą“. O modernių technologijų taikymas pastato projektavimo procese beveik visais atvejais gerins kitus kriterijus, išskyrus „Kainą“.

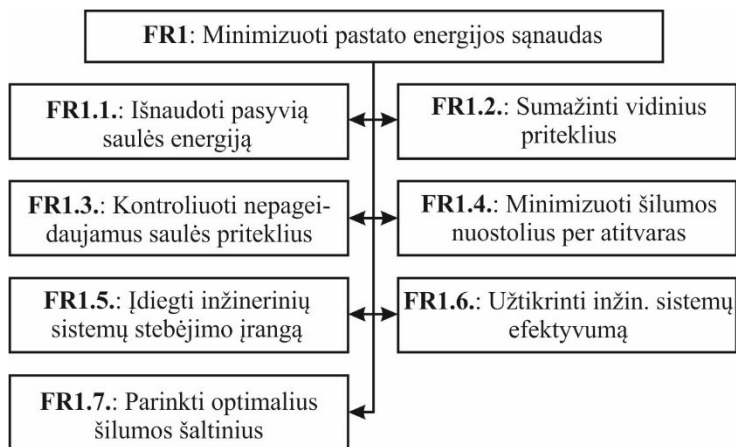
					Žymėjimai									
					⊙	Stiprus ryšys								
					○	Vidutinis ryšys								
					△	Silpnas ryšys								
					↓	Stipri neig. koreliacija								
					–	Neigiama koreliacija								
					++	Stipri teig. koreliacija								
					+	Teigiama koreliacija								
					Rodiklio gerinimo kryptis									
					Min.	Min.	–	–	–	–	–	Min.	–	–
Eil. Nr.	Maksim. reikšmingumas	Santykinis svoris	Reikšmingumas	Keliami reikalavimai	Kaina	Poveikis aplinkai	Modernus projektavimo procesas	Estetika	Funkcionalumas	Greita statyba	Saugumas	Minimizuoti pastato energijos	Aktyv. priem. užtikrinanti norm. komf.	Taikyti išmanius inžin. sprendinius
1.	9	14,0	9,7	Maža kaina	⊙	○	○	○		⊙	△	○	○	⊙
2.	9	14,4	10	Efektyvus	○							○	△	△
3.	9	11,1	7,7	Greita statyba	⊙		△			⊙				△
4.	9	7,2	5	Komfortiškas	△	○						○	○	△
5.	9	8,6	6	Funkcionalus					⊙					
6.	9	8,6	6	Saugus	○						⊙			
7.	9	10,1	7	Patraukli išvaizda	○			⊙						
8.	3	7,9	5,5	Mažiau teršalų aplinką	⊙	⊙	△					⊙	⊙	
9.	3	8,6	6	Atitiktų standartus	⊙	△	△				△			
10.	3	9,4	6,5	Modernus	⊙		○							⊙
Sudėtingumas					9	7	8	6	6	8	6	8	7	6
Maksimalus vertinimas					9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Reikšmingumas					566	144	154	133	78	226	100	308	193	243
Santykinis svoris					26,4	6,7	7,2	6,2	3,6	10,5	4,7	14,4	9,0	11,3

3.2 pav. Kokybės funkcijos išskleidimo namo metodo taikymas 1-ame lygmenyje

Fig. 3.2. 1<sup>st</sup> stage of House of Quality

Projekto konsultantui pildant 2-ojo lygio KFI matricą (3.3 pav.), kur pagrindinėje matricoje detalizuojami techninių reikalavimų ir pagrindinio nagrinėjamo funkcinio reikalavimo „Minimizuoti pastato energijos sąnaudas“ žemesnio lygio reikalavimų koreliacija. Prieš tai šis kriterijus detalizuojamas kiek smulkiau, tai

yra iš ko šis reikalavimas susideda. Tad žemesniame lygmenyje numatyti 7 funkciniai reikalavimai FR1.1.–FR1.7.



**3.3 pav.** FR1 funkcinio reikalavimo žemesnio lygmens funkcinų reikalavimų hierarchija  
**Fig. 3.3.** The lower level hierarchy of FR1 functional requirements

Kalbant apie administracinio pastato energijos sąnaudas, dažniausiai didžiausias dėmesys skiriamas energijos sąnaudoms, šildymui, vėsinimui, apšvietimui bei elektros prietaisų sunaudojamai energijai. Žemesnio lygmens funkciniai reikalavimai nurodo strategijas – ką reikia padaryti, kad būtų galima įgyvendinti pagrindinį reikalavimą – sumažinti energijos sąnaudas. FR1.1., FR1.4. yra labiau orientuoti sumažinti energijos sąnaudas šildymui, FR1.2., FR1.3. – vėsinimui, likę funkciniai reikalavimai – bendram inžinerinių sistemų efektyviam darbui.

Todėl 3.4 paveiksle matyti, kad čia svarbiausi tampa du žemesnio lygio reikalavimai – „Minimizuoti šilumos nuostolius per atitvaras“ (31,1 %) bei „Kontroluoti nepageidaujamus saulės priteklius“ (31,1 %).

KFI „stogo“ matricoje sužymėta žemesnio lygio tarpusavio įtaka parodo, kad gerinant reikalavimą „Išnaudoti pasyvią saulės energiją“ neigiamai lemia „Kontroluoti nepageidaujamus saulės priteklius“ ir taip gerina „Minimizuoti šilumos nuostolius per atitvaras“. Taip pat reikalavimas „Kontroluoti nepageidaujamus saulės priteklius“ neigiamai lemia „Minimizuoti šilumos nuostolius per atitvaras“. Visgi kitame etape bus tikrinama šių funkcinų reikalavimų ir projektinių parametrų nepriklausomybė, tad numatytos tam tikros prielaidos ir laiko režimai, kad šie reikalavimai galėtų būti suderinami.

				Žymėjimai								
				⊙	Stiprus ryšys							
				○	Vidutinis ryšys							
				△	Silpnas ryšys							
				↓	Stipri neig. koreliacija							
				–	Neigiama koreliacija							
				++	Stipri teig. koreliacija							
				+	Teigiama koreliacija							
					<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>							

3.4 pav. KFI namo metodo taikymas – 2-ajame lygmenyje

Fig. 3.4. 2<sup>nd</sup> stage of House of Quality

2-ajame lygmenyje matyti, kad čia svarbiausiu funkciniu reikalavimu tampa „Minimizuoti šilumos nuostolius per atitvaras“.

### 3.1.3. Funkcinių reikalavimų ir dizaino parametrų hierarchijų sukūrimas, taikant aksiomatinio projektavimo metodą

Trečiojo technologijos algoritme numatyto žingsnio pagrindas yra aksiomatinio projektavimo taikymas. Todėl, sudaromos funkcinių reikalavimų ir juos atitinkančių dizaino parametrų hierarchinės schemos. Jos palengvina pastato koncepcijos kūrimą, nurodo konkrečius sprendinius ir leidžia užtikrinti, kad kiekvienas funkcinis reikalavimas bus įgyvendintas.

Prieš tai buvusiame (2-ajame) technologijos algoritmo žingsnyje taikant kokybės funkcijos išskleidimo namo principus, pirminiai lūkesčiai jau buvo struktūrizuoti į techninius ir funkcinius reikalavimus, tad 3-iojo žingsnio siekis yra taikant Zigzaginį gretinimo procesą bei atsižvelgiant į numatytus apribojimus, kiekvienam funkciniam reikalavimui (ką norime pasiekti?) priskirti projektinį parametą (kaip pasiekti/įgyvendinti?).

Toliau bus nagrinėjamas tik vienas funkcinis reikalavimas – FR1 „Minimizuoti pastato energijos sąnaudas“. Projektinių parametrų hierarchijos sudaromos visai funkcinio reikalavimo hierarchijai, tačiau praktiškai bus pritaikyti sprendiniai, susiję su architektūriniais – konstrukciniais sprendiniais. Žemiau pateikta FR1 funkcinio reikalavimo ir jo dizaino parametrų žemesnio lygmens hierarchinės sistemos (3.5 pav.).

Nors kiekvienas projektinis parametras turėtų tenkinti apribojimus, kurie buvo nustatyti kartu su techniniais reikalavimais, šiuo atveju bus įvardyti tik apribojimai konstrukciniams sprendiniams.

Ap0: Apribojimai.

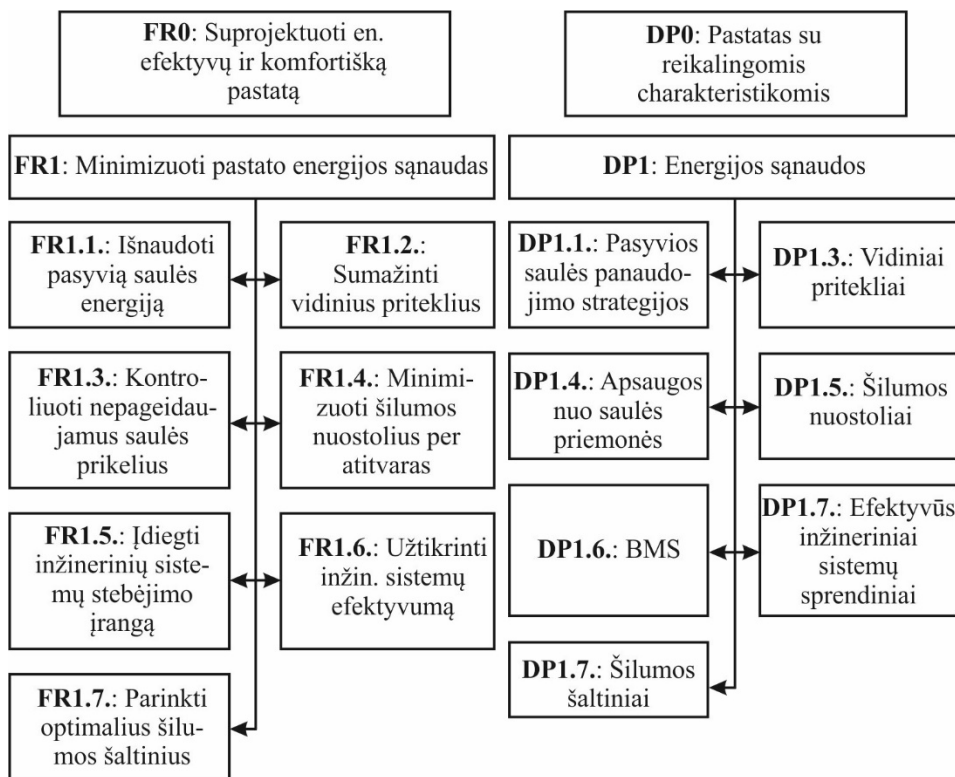
- Ap1: Įstiklinimo plotas ne daugiau 20–40 %;
- Ap2: Sienų šilumos perdavimo koeficientas  $U < 0,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ;
- Ap3: Stogo šilumos perdavimo koeficientas  $U < 0,11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ;
- Ap4: Grindų šilumos perdavimo koeficientas  $U < 0,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ;
- Ap5: Langų šilumos perdavimo koeficientas  $U < 1,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

Iš hierarchinės schemos 3.5 paveiksle matyti, kad FR1 reikalavimas išskaidytas į 7 žemesnio lygmens reikalavimus. Detaliau jie buvo aprašyti pildant KFI namo antrąjį lygmenį ir pateikti 3.3 paveiksle.

Kiekvienam funkciniam reikalavimui priskirtas projektinis parametras parodo kaip, t. y. kokiomis priemonėmis galima įgyvendinti užduotą funkcinį reikalavimą.

Šias funkcines – projektines hierarchines schemas turėtų sudaryti projekto konsultantas, jei stinga savos patirties – pasitelkdamas energijos konsultantą. Sprendiniai turėtų būti kuriami remiantis gerąja patirtimi, literatūra ar specializuotomis gairėmis.



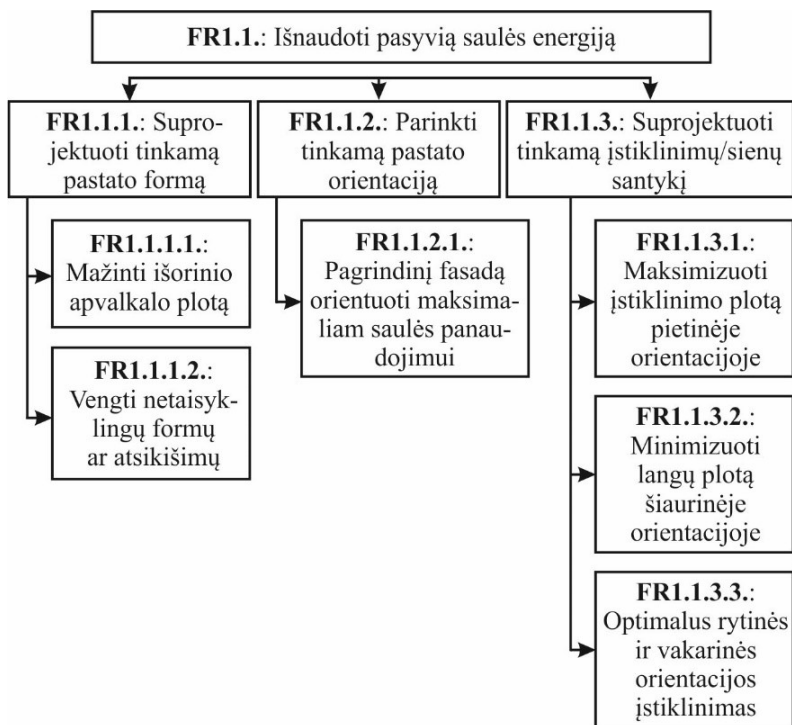


**3.5 pav.** FR1 funkcinio reikalavimo ir dizaino parametų žemesnio lygmens hierarchinė schema

**Fig. 3.5.** The lower level hierarchy of FR1 functional requirements and design parameters

Toliau kiekvienas iš 7 žemesnio lygio funkcinio reikalavimų FR1.1. – FR1.7. skaidomi į dar žemesnio lygio reikalavimus ir jiems priskirtus projektinius parametrus. Žemiausio lygio projektinis parametras atitinka parametą, kuris turės būti panaudotas kuriant pastato koncepciją. Visos hierarchijos schemos pateiktos B priede.

3.6 paveiksle pademonstruota FR1.1. „Išnaudoti pasyvią saulės energiją“ funkcinio reikalavimų ir projektinių parametų hierarchijos sudarymo schema.

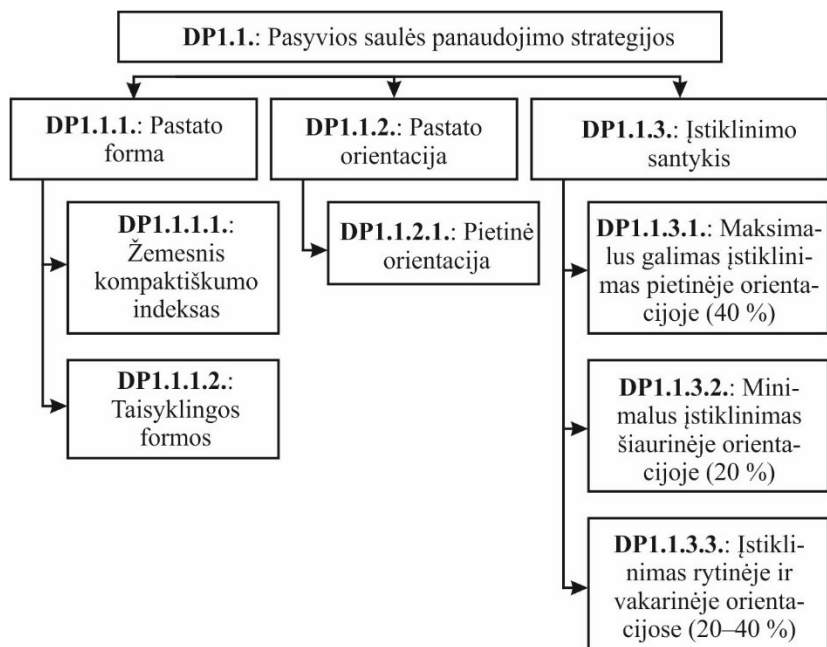


**3.6 pav.** FR1 funkcinio reikalavimo žemesnio lygio parametrų hierarchinė schema

**Fig. 3.6.** The lower level hierarchy of FR1 functional requirements

3.7 paveiksle matyti, kad pagal žemiausio lygio projektinius parametrus matyti, kad kuriant pastato koncepciją, turi būti integruoti šie parametrai:

1. pastato forma turi būti taisyklinga, be atsikišimų.
2. kaip galima mažesnis kompaktiškumo indeksas.
3. pagrindinis pastato fasadas orientuotas į Pietus.
4. pietinėje orientacijoje numatytas maksimalus įstiklinimo plotas (pagal apribojimus 40 %).
5. šiaurinėje orientacijoje minimalus įstiklinimo plotas (pagal apribojimus 20 %).
6. optimalus įstiklinimas rytinėje bei vakarinėje orientacijose (pagal apribojimus 20–40 %).



**3.7 pav.** DP1 projektinio (dizaino) parametro žemesnio lygmens hierarchinė schema  
**Fig. 3.7.** The lower level hierarchy of DP1 design parameters

Trečiajame technologijos algoritmo žingsnyje, vadovaujantis aksiomatinio projektavimo principais, siekiama, kad būtų įgyvendinti visi numatyti funkciniai reikalavimai. Tai įgyvendinama, jei yra tenkinama pirmoji AP – nepriklausomybės aksioma – vienas funkcinis reikalavimas lemia ne daugiau kaip vieną dizaino parametą. Projekto konsultantas, esant būtinybei, konsultuojantis su kitais projekto dalyviais, identifikuoja kiekvieno dizaino parametro ir funkcinio reikalavimo priklausomybes.

Žemiau pateikti analizuojami funkciniai reikalavimai ir jiems priskirti dizaino parametrai.

**FR1.1.:** Išnaudoti pasyvią saulės energiją.

**FR1.2.:** Sumažinti vidinius priteklius.

**FR1.3.:** Kontroliuoti nepageidaujamus saulės priteklius.

**FR1.4.:** Minimizuoti šilumos nuostolius per atitvaras.

**FR1.5.:** Įdiegti inžinerinių sistemų stebėjimo įrangą.

**FR1.6.:** Užtikrinti ŠVOK sistemų efektyvumą.

**FR1.7.:** Parinkti optimalius šilumos šaltinius.

Šiems funkciniams reikalavimams priskirti dizaino parametrai:

**DP1.1.:** Pasyvios saulės panaudojimo strategijos.

**DP1.2.:** Vidiniai pritekiai.

**DP1.3.:** Apsaugos nuo saulės priemonės.

**DP1.4.:** Šilumos nuostoliai.

**DP1.5.:** BMS.

**DP1.6.:** Efektyvūs inžineriniai sistemų sprendiniai.

**DP1.7.:** Šilumos šaltiniai.

Norint nustatyti šių funkcinį reikalavimų ir projektinių (dizaino) parametrų tarpusavio įtaką, 3.3 lentelėje pristatoma ryšių matrica. Kairioji pusė (stulpeliai) atspindi Funkcinius reikalavimus, t. y. ką reikia pasiekti, o dešinioji pusė (eilutė) nusako Dizaino (projektinius) parametrus – kaip funkciniai reikalavimai turėtų būti pasiekti (kokiomis priemonėmis). Užpildyta matrica aiškiai parodo esamą matricos struktūrą.

**3.3 lentelė.** Funkcinių reikalavimų ir dizaino parametrų ryšių matrica

**Table 3.3.** The correlation matrix of functional requirements and design parameters

Dėmuo	DP1.1.	DP1.2.	DP1.3.	DP1.4.	DP1.5.	DP1.6.	DP1.7.
FR1.1.	X		X				
FR1.2.		X					
FR1.3.	X		X				
FR1.4.				X			
FR1.5.					X		
FR1.6.						X	
FR1.7.							X

Pagal matricos struktūrą matyti, kad gauta neleistina porinio dizaino struktūra dėl FR1.1. ir DP1.3. tarpusavio santykio. Funkcinis reikalavimas „FR1.1. Išnaudoti pasyvią saulės energiją” daro įtaką efektyviam projektinio parametro „DP1.3. Apsaugos nuo saulės priemonės“ panaudojimui. Tai reiškia, kad norint išnaudoti pasyvią saulės energiją, siekiama kuo didesnio jos patekimo per pastato atitvaras, bet tai naudinga tik žiemos sezono metu, ir tai iki kol neviršijamos komforto sąlygos. Naudojant apsaugos nuo saulės priemones, pagrindinis siekis yra sumažinti saulės pritekį pateikimą vasarą. Nagrinėjamu atveju, siekiant suderinti šiuos reikalavimus, buvo numatytos kelios priemonės, t. y. stacionarios ir nestacionarios. Mažesnio visuminio saulės energijos praleisties faktoriaus stiklai ir stogeliai virš langų niekaip nebus reguliuojami, tad šiek tiek mažins saulės spinduliuotės pateikimą per skaidrias atitvaras. Numatytos automatinio reguliavimo žaliuzės kontroliuos šilumos pritekį tik vasaros sezono metu, viršijant vidaus komforto temperatūrą, tad nelems funkcinio reikalavimo FR1.1.

Vis dėlto iš KFI antrojo lygio namo matricų matyti, kad kontroliuoti nepageidaujamus saulės pritekius (31,1 %) yra svarbesnis reikalavimas nei išnaudoti pasyvią saulės energiją (4,7 %). Todėl priimama prielaida, kad numatytos saulės kontrolės priemonės nesudarys nepageidaujamos įtakos. Žemesniųjų lygių parametrų ryšių nustatymas pristatytas C priede. Galutinė funkcinio reikalavimų ir projektinių parametrų ryšių matrica atrodo taip 3.4 lentelėje.

**3.4 lentelė.** Galutinė funkcinio reikalavimų ir dizaino parametrų ryšių matrica

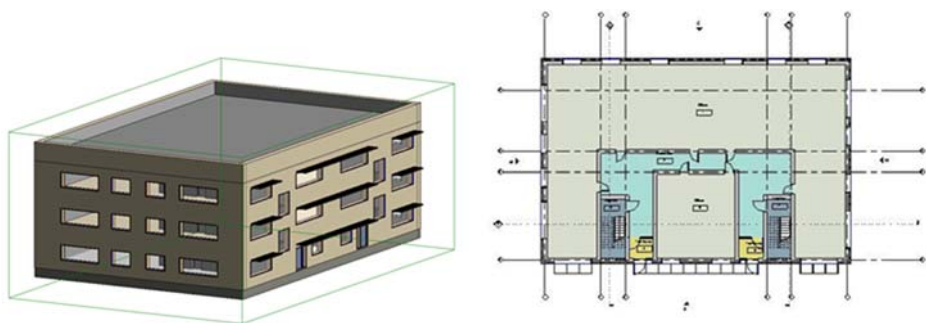
**Table 3.4.** The final correlation matrix of functional requirements and design parameters

Dėmuo	DP1.1.	DP1.2.	DP1.3.	DP1.4.	DP1.5.	DP1.6.	DP1.7.
FR1.1.	X						
FR1.2.		X					
FR1.3.			X				
FR1.4.				X			
FR1.5.					X		
FR1.6.						X	
FR1.7.							X

*Pastaba:* toliau nagrinėjama tik dalis schemos, t. y. funkciniai reikalavimai konkrečiai susiję su pastato architektūra ir konstrukcijomis.

### 3.1.4. Pastato koncepcijos projektavimas

Remiantis 4-uoju technologijos algoritme numatytu žingsniu, projektuojama sukurta pastato koncepcija. Šis žingsnis remiasi projekto konsultanto paruošta medžiaga: identifikuotais reikalavimais, apribojimais bei paruoštomis funkcinio reikalavimų – dizaino parametrų – hierarchinėmis schemomis. Jos nurodo pagrindinius parametrus, kurie turėtų būti panaudoti siekiant greičiau rasti įprastinius reikalavimus orientuotą sprendinį. Galutinius sprendinius paruošia ir pritaiko architektas naudojant KFI matricas, parodančias skirtingų projektinių sprendinių įtaką kitiems reikalavimams. Sekant šiuos žingsnius, programoje Revit (4 (a) žingsnis) buvo sukurtas pastato architektūros sprendinys (3.8 pav.), kuriam pritaikyti numatyti projektiniai parametrai, susiję su architektūrine konstrukcine dalimi.



**3.8 pav.** Atvejo analizei suprojektuotas architektūros sprendinys Revit programoje  
**Fig. 3.8.** The design solution for the case study of a building in Revit software

Revit programoje sukurtą pastato modelį transportavus į modeliavimo programą Designbuilder, buvo atliktas energinis modeliavimas (4 (b) žingsnis). 3.5 lentelėje pateiktos pastato apvalkalo, priimtų sprendinių ir prielaidų charakteristikos. Numatyta, kad pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientai atitinka A+ energinio naudingumo klasę. Inžinerinės sistemos ir šilumos šaltiniai šiuo atveju nėra detalizuojami.

**3.5 lentelė.** Suprojektuoto pastato charakteristikos  
**Table 3.5.** The characteristics of the designed building

Charakteristikos			Reikšmės
1			2
Geometrija	Plotas	m <sup>2</sup>	2183
	Orientacija	°	Pietūs
	Langų ir išorinių sienų santykis	%	25 %
Pastato elementų šilumos perdavimo koeficientai	$U_{IS}$	W/m <sup>2</sup> ·K	0,13
	$U_{ST}$	W/m <sup>2</sup> ·K	0,1
	$U_{GR}$	W/m <sup>2</sup> ·K	0,14
	$U_L$	W/m <sup>2</sup> ·K	0,719
Sandarumas	Infiltracija, esant 50 Pa viršslėgiui	h <sup>-1</sup>	0,6
Pasyviosios apsaugos nuo saulės priemonės	Stogeliai, išorinės automatinės žaluzijos		-

3.5 lentelės tęsinys

1		2
Langų optinės savybės	Visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientas $g$	0,479
	Šviesos praleisties koeficientas	0,681
Vietovės ir klimato duomenys	Vietovė	Kaunas
	Lauko oro temperatūra	
	– šaltuoju laikotarpiu	–20
	– šiltuoju laikotarpiu	27,9
Pastato naudojimo režimai	Administracinės patalpos, darbo kambariai	I–V 7:30–18:00
	Darbuotojų buvimo laikas	I–V 7:30–18:00 VI, VII (–)
	Biuro įrangos naudojimo laikas	I–V 7:30–18:00 VI, VII (–)
	Apšvietimo sistemų darbo laikas	I–V 7:30–18:00 VI, VII (–)
	Šildymo sistemos darbo laikas šaltuoju metu	I–VII 0:00–24:00
	Vėdinimo sistemos darbo laikas	I–V 7:30–18:00
	Vėsinimo sistemos darbo laikas šiltuoju sezonu	I–V 7:30–18:00
Šiluminio komforto užtikrinimas	– Patalpų oro temperatūra šaltuoju laikotarpiu	I–V (7:30–18:00) –21 °C I–V (18:00–7:30) –18 °C VI, VII (0–24:00) –18 °C
	– Patalpų oro temperatūra šiltuoju laikotarpiu	I–V (7:30–18:00) 24 °C I–V (18:00–7:30), VI, VII (0–24:00) – temperatūra nereguliuojama
Oro kokybės užtikrinimas	Administracinėms patalpoms	3,6 m <sup>3</sup> /h·m <sup>2</sup>

3.5 lentelės pabaiga

1		2
Prielaidos	Šilumos srautas nuo žmonių, el. įrengimų	15 W/m <sup>2</sup>
	Šilumos srautas nuo apšvietimo	8 W/m <sup>2</sup> / 400 lux
	Apšvietimo reguliavimas	Žingsninis
	Vėdinimo sistemų temperatūrinis šilumos atgavimo efektyvumas	0,8
	Vėsintuvo efektyvumas	EER 5.5
	Energijos šaltinis šilumos gavimui	Dujinis katilas
	Energijos šaltinis elektros gavimui	Miesto tinklai
	Prietaisai	Ventiliatoriniai konvektoriai
	PE koeficientas elektrai	2,8
	PE koeficientas gamtinėms dujoms	1,1

Siekiant pademonstruoti technologijos algoritmo 5-ąjį žingsnį – sprendimų priėmimą – buvo nagrinėjamos dvi žaliuzių alternatyvos.

Esant kelioms projektinių sprendinių variacijoms, technologija siūlo arba išsirinkti geriausią, taikant COPRAS (5-as (c) žingsnis) sprendimų priėmimo metodą, arba taikyti aksiomatinio projektavimo informacijos aksiomą (5-as (b) žingsnis), siekiant surasti konkrečią skaitinę reikšmę labiausiai atitinkantį sprendinį.

Šiuo atveju pagal funkcinį reikalavimą „FR1.3: Kontroliuoti nepageidaujamus saulės pritekį“ kaip žemiausio lygio privalomas pritaikyti projektinis parametras buvo „DP1.3.2. Vidinės, išorinės žaliuzės“ su „DP1.4.2.1.: Automatinė valdymo sistema“. Tai reiškia, kad architektas turi teisę rinktis jo manymu tinkamesnę apsaugos nuo saulės priemonę – vidines ar išorines žaliuzes. Kad funkciniai reikalavimai nebūtų prieštaraujantys, žaliuzės turi būti automatinės ir nelemti saulės pritekį žiemą, t. y. veikti tik vasaros metu.

Siekiant pademonstruoti 5-ąjį žingsnį – sprendimų priėmimo etapą – priimama prielaida, kad pirminiame etape buvo tikimasi, kad energijos sąnaudos šildymui, vėsinimui ir apšvietimui atitiks numatytas konkrečias numatytas skaitines reikšmes (3.8 lentelė).

Tokiu atveju sekant technologijos algoritme numatyta eiga, siūloma išrinkti sprendinį naudojantis daugiakriteriu sprendimų priėmimo metodu COPRAS (5-as (c) žingsnis) arba taikant informacijos aksiomą (5-as (a) žingsnis). Šiuo atveju esant dviem žaliuzių alternatyvoms ir numatytomis konkrečiomis skaitinėmis



reikšmėmis, tinkamiausia alternatyva bus išrenkama naudojantis antrąja – Informacijos aksioma, kurios tikslas rasti sprendinį, kurio energinės charakteristikos artimiausios užduotai reikšmei.

Suprojektuotos dvi žaliuzių alternatyvos, kurių techninės charakteristikos pateiktos 3.6 lentelėje.

### 3.6 lentelė. Žaliuzių charakteristikos

**Table 3.6.** The characteristics of louver

Savybės	1 variantas	2 variantas
Tipas	Išorinės žaliuzės	Vidinės žaliuzės su aukšto atspindžio juostelėmis
Pozicija	Horizontalios išorinės	Horizontalios vidinės
Valdymas	Pagal vidaus temperatūrą	Pagal vidaus temperatūrą
Valdymo režimas	Vasarą, darbo dienomis: 6–18 h (kitu laiku neveikia), viršijant 24 °C vidaus temperatūrą	Vasarą, darbo dienomis: 6–18 h (kitu laiku neveikia), viršijant 24 °C vidaus temperatūrą

Kadangi pagrindinis tikslas yra minimizuoti energijos sąnaudas, buvo sumodeliuotos pastato alternatyvos naudojant šiuos skirtingus žaliuzių variantus. Gauti pastato energijos suvartojimai šioms žaliuzių alternatyvoms pateikti 3.7 lentelėje.

### 3.7 lentelė. Pastato energijos sąnaudos

**Table 3.7.** The energy consumption of the building

Variantai	Pastato energijos sąnaudos, kWh/m <sup>2</sup>					
	Šildymui	Vėsinimui	Apšvietimui	Įrangai	Ventiliatoriams, siurbliams	Pirminė energija
1 variantas	4,6	8,9	11,7	32,2	9,0	178
2 variantas	4,3	9,4	12,2	32,2	9,3	181,4

Iš lentelės matyti, kad šių žaliuzių rezultatai panašūs, tačiau prie išorinių žaliuzių pastato PE sąnaudos mažesnės.

### 3.1.5. Sprendinių tinkamumo nustatymas, taikant Informacijos aksiomą

Sekant 5-ąją (c) technologijos algoritmo žingsnį, taikoma antroji AP informacijos aksioma. Ji suteikia galimybę įvertinti visų galimų (tenkinančių Nepriklausomybės aksiomą) dizaino sprendinių tinkamumą kiekybiškai ir teigia, kad gautas sprendinys, turintis mažiausią  $I$  reikšmę, yra geriausias sprendinys, nes jam reikalingas mažiausias informacijos turinys pasiekti norimą dizainą. Nagrinėjamu atveju apskaičiuoti informacijos aksiomos vertinimo rodikliai dviem prieš tai (3.7 lentelė) sumodeliuotiems žaliuzių variantams (3.8 lentelė).

**3.8 lentelė.** Žaliuzių alternatyvų informacijos aksiomos vertinimo rodikliai  
**Table 3.8.** The indicators of Information axiom evaluation for louver alternatives

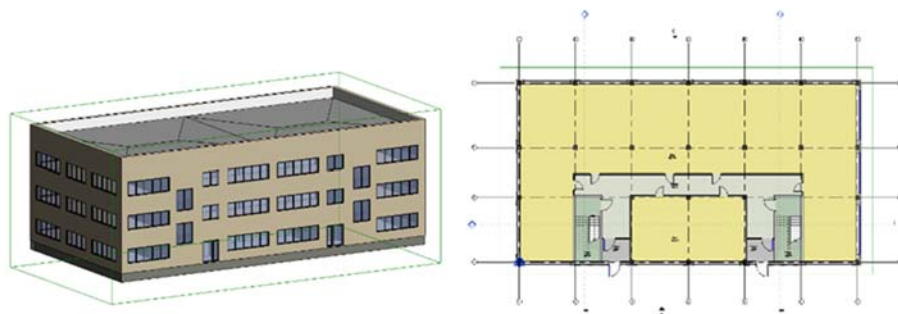
Variantai	Energijos sąnaudos, kWh /m <sup>2</sup>			Patikimumo reikšmė, $p$	Informacijos suma, $I$
	Šildymui	Vėsinimui	Apšvietimui		
Tikslas	4,2	8,5	11,0		
1-as variantas	4,6	8,9	11,7	1,095+1,04+1,06	0,082
2-as variantas	4,3	9,4	12,2	1,02+1,11+1,11	0,099

Rezultatai parodė, kad integruotos išorinės žaliuzės ir jų rezultatų Informacijos turinys turi geresnius (mažesnius) rodiklius, tad yra artimesnis keliamiems tikslams ir pasirenkama kaip geresnė alternatyva.

## 3.2. Pastato koncepcijos kūrimas tradicinio projektavimo metodu

Tradicinio projektavimo procese paraleliai nedalyvauja visos projekto grupės – remiamasi daugiausiai architekto patirtimi, inžineriniai sprendiniai derinami prie esamos architektūrinės situacijos.

Sekant įprasta tradicinio projektavimo proceso eiga, sukuriamas administracinio pastato koncepcinis modelis programoje Revit, pavaizduotas 3.9 paveiksle.



**3.9 pav.** Tradicinio projektavimo metodu suprojektuotas architektūros sprendinys Revit programoje

**Fig. 3.9.** Building design solution made using traditional building design procedure in Revit software

Siekiant įvertinti priimtų sprendinių efektyvumą ir įtaką pagrindiniam funkciniam reikalavimui – minimizuoti pastato energijos sąnaudas – pastato modelis iš programos Revit transportuotas į energinio modeliavimo priemonę DesignBuilder. 3.9 lentelėje matyti pagrindinės konstrukcinės pastato savybės.

**3.9 lentelė.** Pastato charakteristikos

**Table 3.9.** Building characteristics

Charakteristikos			Reikšmės
1			2
Geometrija	Plotas	m <sup>2</sup>	1969
	Orientacija	°	Pietūs
	Langų ir išorinių sienų santykis	%	40 %
Pastato elementų šilumos perdavimo koeficientai	$U_{IS}$	W/m <sup>2</sup> ·K	0,13
	$U_{ST}$	W/m <sup>2</sup> ·K	0,1
	$U_{GR}$	W/m <sup>2</sup> ·K	0,14
	$U_L$	W/m <sup>2</sup> ·K	1,1
Sandarumas	Infiltracija, esant 50 Pa viršslėgiui	h <sup>-1</sup>	0,6
Pasyviosios apsaugos nuo saulės priemonės	—		—

3.9 lentelės tęsinys

1		2
Langų optinės savybės	Visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientas $g$	0,7
	Šviesos praleisties koeficientas	0,738
Vietovės ir klimato duomenys	Vietovė	Kaunas
	Lauko oro temperatūra	
	– šaltuoju laikotarpiu	–20
	– šiltuoju laikotarpiu	27,9
Pastato naudojimo režimai	Administracinės patalpos, darbo kambariai	I–V 7:30–18:00
	Darbuotojų buvimo laikas	I–V 7:30–18:00 VI, VII (–)
	Biuro įrangos naudojimo laikas	I–V 7:30–18:00 VI, VII (–)
	Apšvietimo sistemų darbo laikas	I–V 7:30–18:00 VI, VII (–)
	Šildymo sistemos darbo laikas šaltuoju metu	I–VII 0:00–24:00
	Vėdinimo sistemos darbo laikas	I–V 7:30–18:00
	Vėsinimo sistemos darbo laikas šiltuoju sezonu	I–V 7:30–18:00
Šiluminio komforto užtikrinimas	– Patalpų oro temperatūra šaltuoju laikotarpiu	I–V (7:30–18:00) –21 °C I–V (18:00–7:30) –18 °C VI, VII (0–24:00) –18 °C
	– Patalpų oro temperatūra šiltuoju laikotarpiu	I–V (7:30–18:00) 24 °C I–V (18:00–7:30), VI, VII (0–24:00) – temperatūra nereguliuojama
Oro kokybės užtikrinimas	Administracinėms patalpoms	3,6 m <sup>3</sup> /h·m <sup>2</sup>

3.9 lentelės pabaiga

1		2
Prielaidos	Šilumos srautas nuo žmonių, el. įrengimų	15 W/m <sup>2</sup>
	Šilumos srautas nuo apšvietimo	8 W/m <sup>2</sup> /400 lux
	Apšvietimo reguliavimas	Žingsninis
	Vėdinimo sistemų temperatūrinis šilumos atgavimo efektyvumas	80%
	Vėsintuvo efektyvumas	EER 5.5
	Energijos šaltinis šilumos gavimui	Dujinis katilas
	Energijos šaltinis elektros gavimui	Miesto tinklai
	Prietaisai	Ventiliatoriniai konvektoriai
	PE koeficientas elektrai	2,8
	PE koeficientas gamtinėms dujoms	1,1

Tradicioinio projektavimo metu suprojektuoto 1969 m<sup>2</sup> pastatas, kurio atitvarų šilumos perdavimo koeficientai atitinka A+ energinio naudingumo klasę. Taip pat 3.9 lentelėje matyti, kad šiuo atveju suprojektuoti pagal apribojimus maksimalūs įstiklinimo plotai, tačiau nesuprojektuotos papildomos apsaugos nuo saulės priemonės. Lyginant su pagal siūlomą pastato koncepcijos parengimo technologiją suprojektuotu pastatu, čia parinkti langai su didesniu šilumos perdavimo koeficientu bei didesniais visuminės saulės spinduliuotės praleisties koeficientas.

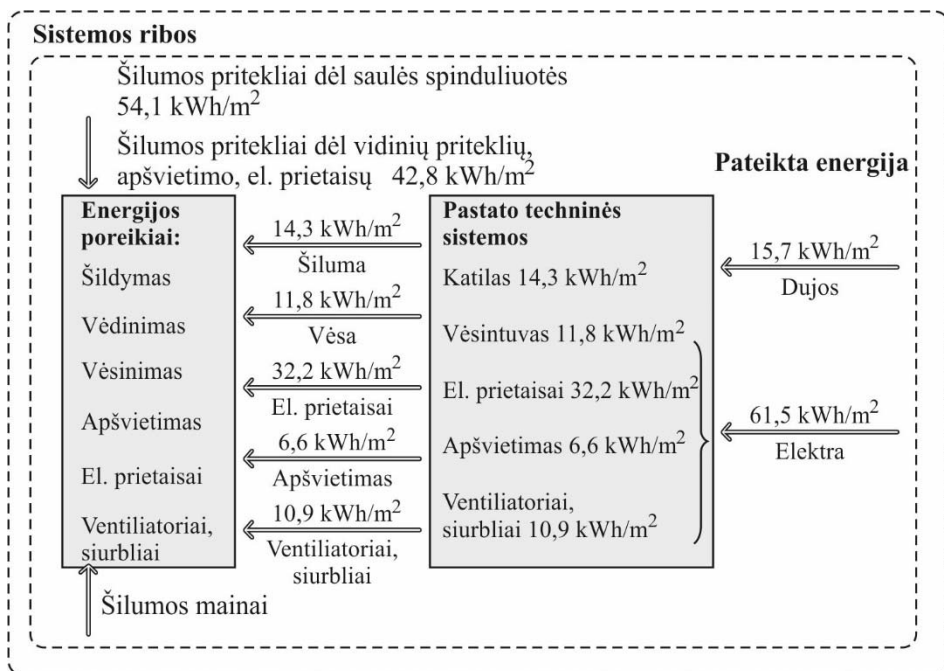
### 3.3. Parengtų pastato koncepcijų palyginimas

Remiantis sukurta technologija bei tradicioinio projektavimo metodu, įvykdyti du projektavimo procesai.

Siekiant palyginti, kaip kiekvienas jų tenkina pagrindinį keliamą funkcinį reikalavimą – minimizuoti pastato energijos sąnaudas – buvo atliktas energinis modeliavimas ir nustatyti energetiniai rodikliai. Sudarant techninių reikalavimų – projektinių (dizaino) parametrų – matricas, didžiausias dėmesys buvo skirtas sumažinti šildymo ir vėsinimo poreikius, todėl sudarytame palyginime šioms dedmosioms ir bus skiriamas didžiausias dėmesys.

Abiejų pastatų energijos srautų balansai pristatyti 3.10 ir 3.11 paveiksluose.

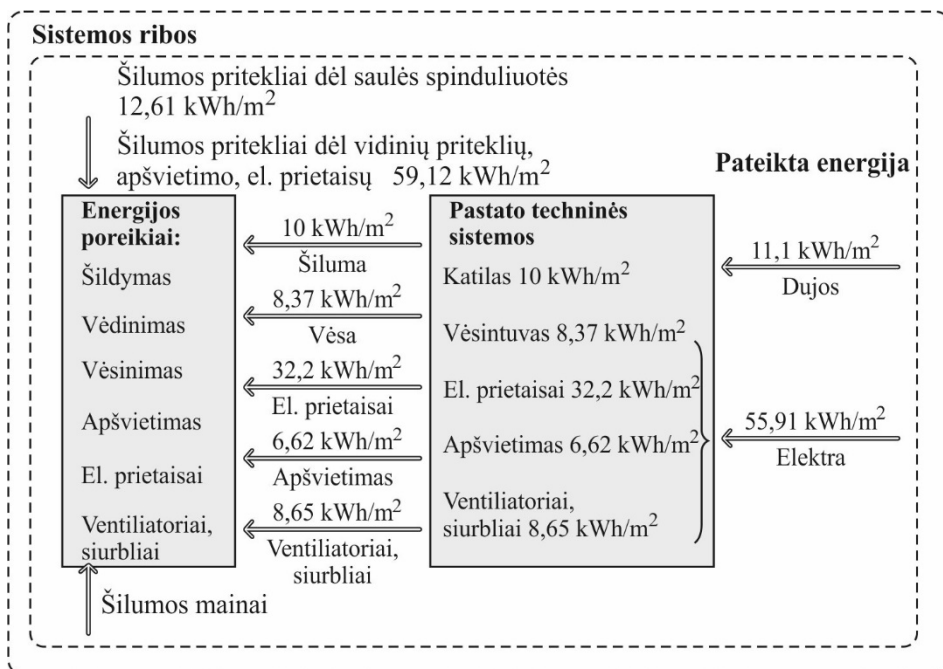
Kaip matyti iš 3.10 paveiksle, pagal sukurta technologiją suprojektuoto pastato energijos poreikių balanse pristatyti pastato šilumos ir elektros energijos poreikiai bei papildomi šilumos protekiai dėl saulės spinduliuotės (per skaidrias atitvaras), dėl vidinių pritekčių (apšvietimo, elektros prietaisų).



**3.10 pav.** Remiantis pastato koncepcijos parengimo technologija suprojektuoto pastato energijos poreikių balansas

**Fig. 3.10.** The energy balance of a building, designed by developed Conceptual Building Design Technology

Iš energijos poreikių balansų matyti, kad pagrindinis projekto pradžioje numatytas funkcinis reikalavimas minimizuoti pastato energijos sąnaudas, susideda iš šių dedamųjų: energijos sąnaudos šildymui (dujos), elektros energijos sąnaudos vėsinimui, prietaisams, apšvietimui, prietaisams, ventiliatoriams ir siurbliams. Abiem atvejais pastatas šildomas ir vėšinamas ventiliatoriniais konvektoriais. Elektros energija tiekama iš miesto tinklų, o šilumą gamina dujinis katilas.



**3.11 pav.** Tradicinio projektavimo metodu sukurto pastato energijos poreikių balansas  
**Fig. 3.11.** The energy balance of a building, designed by traditional building design process

3.10 lentelėje pateiktas dviejų projektavimo procesų efektyvumo palyginimas. Matyti, kad techniniai rezultatai nėra vienareikšmiškai geresni sukurto technologijos atveju, tačiau integralus pirminės energijos (PE) rodiklis jos atveju geresnis.

**3.10 lentelė.** Dviejų projektavimo procesų efektyvumo palyginimas

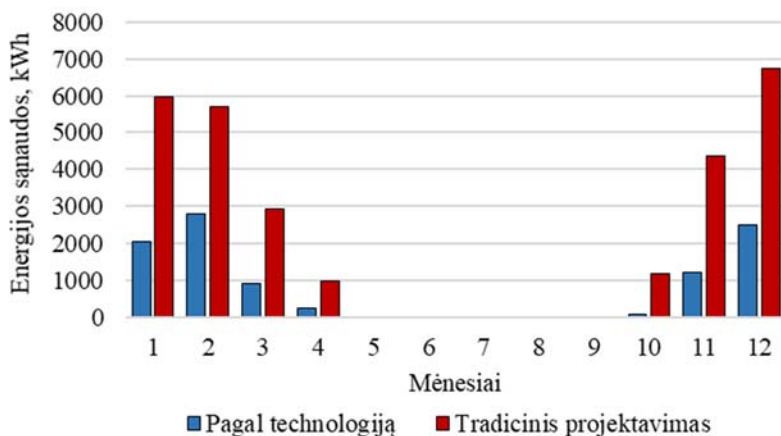
**Table 3.10.** The comparison of the efficiency of two design processes

Energijos sąnaudos	Remiantis sukurta technologija	Tradicinis projektavimas	Technologijos pranašumas (+)/silpnybė (-)
Šildymui, $\text{kWh/m}^2$	4,6	14,3	>100 %
Vėsinimui, $\text{kWh/m}^2$	8,9	11,78	24 %
Apšvietimui, $\text{kWh/m}^2$	11,71	6,6	-77 %
Siurbliams, ventiliatoriams, $\text{kWh/m}^2$	9	10,9	17 %
PE, $\text{kWh/m}^2$	88	98	11 %

Nagrinėjamu atveju pastatas, sukurtas pagal siūlomą technologiją, beveik visais parametrais buvo efektyvesnis, t. y. tik elektros energijos sąnaudos apšvietimui turėjo prastesnius rodiklius. Tačiau balanso dedamosios, kurių gerinimui buvo skiriamas didžiausias dėmesys – energijos poreikiai šildymui ir vėsinimui – parodo savo pranašumus prieš tradicinio projektavimo rezultatus.

Taip pat matyti, kad ypač išsiskiria du rodikliai: energijos sąnaudos šildymui – jos beveik 3 kartus mažesnės, o elektros energijos sąnaudos apšvietimui išauga beveik 2 kartus.

Esant skirtingiems mėnesiams (3.12 pav.) pagal technologiją sukurto pastato energijos sąnaudos šildymui buvo pranašesnės nuo 2-iejų iki keliolikos kartų. Didžiausias skirtumas išryškėja šildymo sezono pradžioje, nors saulės šilumos priitekiai spalio mėnesį tradicinio projektavimo metu suprojektuotame pastate buvo 62 % didesni (3.15 pav.), tačiau didesni įstiklinimo plotai, prastesnės šiluminės savybės ir kompaktiškumo indeksas lemia didesnes energijos sąnaudas šildymui ne tik spalio mėnesį, tačiau ir visą sezoną.



**3.12 pav.** Tradicinio projektavimo ir remiantis technologija sukurtų pastatų metinių energijos poreikiai šildymui palyginimas

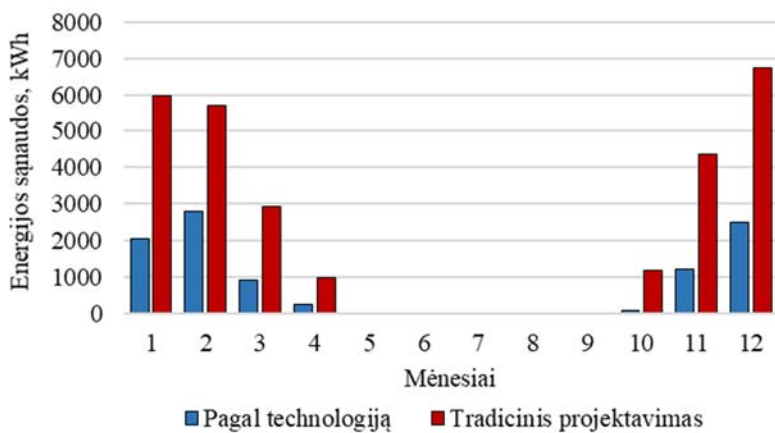
**Fig. 3.12.** The comparison of annual energy consumption for heating of buildings, designed by traditional process and developed Conceptual Building Design Technology

3.13 paveiksle pavaizduotas elektros energijos sąnaudų apšvietimui kitimas. Didesnės elektros sąnaudos apšvietimui buvo apskaičiuotos pastatui, kurtam pagal technologiją, ypač tai pastebima vasaros laikotarpiu. Pagrindinės priežastys būtų tos, kad pagal technologiją sukurto pastato įstiklinimo plotai mažesni, tad atitinkamai mažiau patenka ir šviesos, taip pat numatytos apsaugos nuo saulės



priemonės, t. y. stogeliai ir išorinės automatinės žaliuzės. Išorinės žaliuzės veikia tik vasaros metu, vidaus temperatūrai viršijant 24 °C.

Taip pat, nors pagal technologiją sukurta pastate naudojamos geresnės šiluminės savybės, visgi nusileidžia optinėms šviesos praleisties faktoriumi. To pagrindinė priežastis yra būtent išorinių žaliuzių veikimas vėsinimo sezono metu – gegužės-rugsėjo mėnesiais.

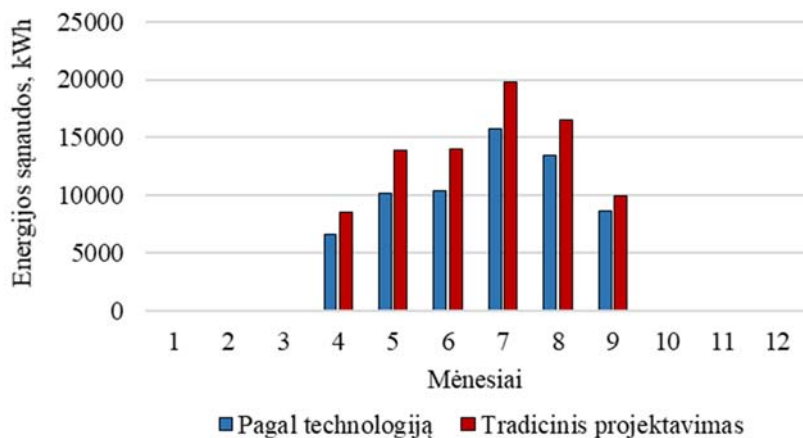


**3.13 pav.** Tradicinio projektavimo ir remiantis technologija sukurto pastatų metinių energijos poreikiai apšvietimui palyginimas

**Fig. 3.13.** The comparison of annual energy consumption for lighting of buildings, designed by traditional process and developed Conceptual Building Design Technology

Analizuojant dviejų pastatų mėnesines sąnaudas vėsinimui (3.14 pav.), matyti, kad priklausomai nuo mėnesių pagal technologiją sukurto pastato rodikliai buvo daug geresni – nuo 14 iki 27 %. Tam yra keletas priežasčių – skirtingos pastatų formos, mažesnis įstiklinimo plotas, geresnės stiklo paketų savybės, naudojamos reguliuojamos apsaugos nuo saulės priemonės vasarą. Didžiausi skirtumai atsiranda gegužės ir birželio mėnesiais.

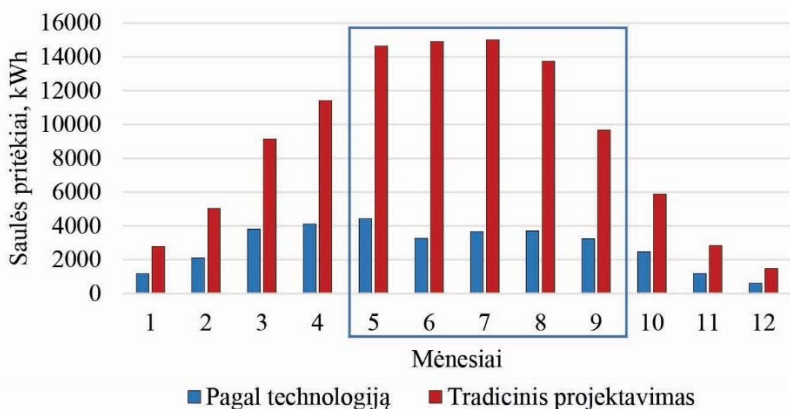
Sudarius KFI antrojo lygio matricas, buvo nustatyta, kad siekiant minimizuoti pastato energijos sąnaudas, vieni svarbiausių žemesnio lygio reikalavimų – minimizuoti šilumos nuostolius per atitvaras (kas matyti iš 3.12 pav. labiausiai sumažino šildymo sąnaudas) ir kontroliuoti nepageidaujamus šilumos pritekius – labiausiai lemiančius vėsinimo išlaidas. Papildomi saulės pritekliai žiemą sumažina šildymo išlaidas, bet kad šie funkciniai reikalavimai neprieštarautų vienas kitam ir tenkintų nepriklausomybės aksiomą, pagal technologiją siūlomoms išorinėms žaliuzėms buvo numatytas automatinis valdymas tik vasaros sezono metu viršijant vidaus komfortinę temperatūrą 24 °C.



**3.14 pav.** Tradicinio projektavimo ir remiantis technologija sukurėtų pastatų metinių energijos poreikių vėsinimui palyginimas

**Fig. 3.14.** The comparison of annual energy consumption for cooling of buildings, designed by traditional process and developed Conceptual Building Design Technology

Lyginant saulės pritekį per metus 3.15 paveiksle matyti, kad pagal technologiją sukurta pastate saulės pritekiai mažesni nuo dviejų iki keturių kartų. Didžiausias skirtumas jaučiasi vasaros sezono metu dėl veikiančių išorinių žaliuzių.



**3.15 pav.** Tradicinio projektavimo ir remiantis technologija sukurėtų pastatų metinių saulės pritekų palyginimas

**Fig. 3.15.** The comparison of annual solar gains of buildings, designed by traditional process and developed Conceptual Building Design Technology

Apibendrinant galima teigti, kad technologijos taikymas leidžia greičiau surasti sprendinį, kuris tenkintų užduotus pirminius reikalavimus. Šiuo atveju ne pagal technologiją sukurtas pastatas pranašesnis tik vienu aspektu – mažesnėmis energijos sąnaudomis apšvietimui, tačiau sudarant techninių reikalavimų- projektinių parametrų matricas šiai dedamajai nebuvo skiriamas išskirtinis dėmesys.

Modeliavimo rezultatai ir parodė, kad pagal parengtą technologiją sukurto pastato energijos sąnaudos šildymui (sumažinus šilumos nuostolius per atitvaras) tampa beveik 3 kartais mažesnėmis, o energijos sąnaudos vėsinimui – beveik ketvirtadaliu mažesnės.

Nagrinėjant nuosekliau ir detaliau, galima konkretizuoti kiekvieną energijos balanso rodiklį ir sukurti funkcinį reikalavimų – dizaino parametrų hierarchijas siekiant kiekvieną jų išpildyti. Šiuo atveju buvo pasirinktas nedidelis pavyzdys norint pademonstruoti technologijos seką ir parodyti jos pranašumus. Detalizuojuojant sukurtos technologijos trūkumus, būtų galima įvardinti du aspektus – papildomo projekto konsultanto vaidmuo ir nepriklausomybės aksiomos užtikrinimas.

Technologijos algoritmo sekos vykdymui numatytas projekto konsultantas – tai papildomas projekto dalyvis, kurio funkcija yra tarpininkauti visoms projekto grupėms, užtikrinti jų sklandų bendradarbiavimą, taip pat rinkti ir apdoroti projektui reikalingą informaciją. Tai reiškia, kad konsultantas turi turėti reikalingas kompetencijas ne tik IPP kontekste, tačiau ir specialių modeliavimo įrankių naudojime.

Vienas iš sukurtos technologijos algoritmo siekių yra įgyvendinti visus numatytus funkcinis reikalavimus. Tai įgyvendinama, jei yra tenkinama pirmoji AP – nepriklausomybės aksioma – vienas funkcinis reikalavimas lemia ne daugiau kaip vieną dizaino parametą. Priešingu atveju nebegalima užtikrinti visų funkcinį reikalavimų įgyvendinimo, tad funkciniai reikalavimai turi būti išskaidyti, performuoti arba priimtos tam tikros prielaidos.

Atvejo analizėje buvo apibrėžta, kad projektuojant pastatą norima išnaudoti pasyvią saulės energiją (tam numatytos pasyvios saulės panaudojimo strategijos), bet tuo pačiu ir kontroliuoti saulės pritekį – tam numatytos apsaugos nuo saulės priemonės. Siekiant tenkinti abu funkcinis reikalavimus ir išlaikyti dizaino parametrų nepriklausomybę, buvo numatomas automatinis apsaugos nuo saulės priemonių (žaliuzių) valdymas ir panaudojimas tik vasaros metu. Kitu atveju saulės pritekio ribojimas ir tam numatytų priemonių naudojimas įtakotų kitą funkcinį reikalavimą – panaudoti pasyvią saulės energiją. Tai reiškia, kad tokiems sprendimams priimti reikalinga projekto konsultanto kompetencija ir tamprus bendradarbiavimas su projekto grupėmis.

Kadangi pabrėžiama, kad sukurta technologija universali – tinka ir pagal kitus (ne energetinius) kriterijus ieškomas sprendinys. Tokiu atveju technologijos algoritmo seka ir integruotų aksiomatinio projektavimo ir kokybės funkcijos išsklei-

dimo metodų taikymas išlieka, tik gali būti pasirinkti kiti problematiką atitinkantys projektavimo ir modeliavimo įrankiai. Atskirai turėtų būti įvertintos šių įrankių duomenų transportavimo galimybės.

### 3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atvejo analizės metodu pademonstruotas siūlomos pastato koncepcijos rengimo technologijos veiksnumas, nustatant pastato apdaro funkcionalumą sukurtu ir tradicinio projektavimo metodais:
  - a) nustatyta, kad pirminiu priartėjimu siekiant minimizuoti energijos sąnaudas, šildymo sąnaudos sumažėjo beveik 3 kartus, o vėsinimo sąnaudos sumažėjo beveik ketvirtadaliu. Pritaikyti technologijoje numatyti projektiniai sprendiniai PE sąnaudas sumažino 9 %;
  - b) taikant siūlomą pastato koncepcijos rengimo technologiją ne visi rezultatai buvo vienareikšmiškai geresni – pritaikyti projektiniai sprendiniai beveik dvigubai išdidino elektros sąnaudas apšvietimui. To priežastis – nedetalizuotas funkcinis reikalavimas šiems parametrams minimizuoti;
  - c) vertinant žemesnio lygio funkcinį reikalavimą – sumažinti saulės pritekčius per atitvaras vasarą – matyti, kad pagal technologiją pritaikyti projektiniai sprendiniai sumažino saulės pritekčius nuo 2 iki 4 kartų.
2. Taikant pastato koncepcijos rengimo technologiją, sukurta funkcinių reikalavimų ir dizaino parametrų hierarchija sąlygojo mažiau iteracijų reikalaujantį, pagrindinį funkcinį reikalavimą atitinkti sprendinio radimą.
3. Siūlomos technologijos algoritme numatytas informacijos aksiomos tikrinimas iš galimų alternatyvų leido efektyviau nustatyti sprendinį, savo skirtingomis energinių charakteristikų skaitinėmis reikšmėmis labiausiai atitinkančiomis tikslu numatytus.
4. Atvejo analizė parodė, kad skaitmeninių modeliavimo priemonių ir sprendimų priėmimo metodų taikymas sukūrtoje pastato koncepcijos rengimo technologijoje leidžia rasti tikslesnius sprendinius, apimančius skirtingus vertinimo kriterijus
5. Pademonstruotas siūlomos pastato koncepcijos rengimo technologijos tinkamumo patikrinimas išryškino ir technologijos apribojimus, susijusius su AP nepriklausomybės aksiomos taikymu.
6. Patikrintas sukurto pastato koncepcijos rengimo technologijos veiksnumas įrodė technologijos universalumą ir galimybę rasti įvairius, ne tik su energiniu funkcionalumu susijusius sprendinius.

---

## Bendrosios išvados

1. Atlikta mokslinių tyrimų analizė parodė, kad integruoto pastato projektavimo (IPP) principai ir skaitmeninio projektavimo priemonės vertinami kaip vieni svarbiausių veiksnių tvarių pastatų projektavime. Tačiau jų sąveikos darnumas vis dar stokoja formalizuotų procedūrų ir lieka dideliu iššūkiu plačiai taikomų architektūrinių – konstrukcinių sprendinių paieškai, jų energinio funkcionalumo vertinimui, kartu siekiant įgyvendinti užsakovo lūkesčius.

2. Sukurta detalizuota 6 žingsnių pastato darnaus sprendinio paieškos procedūrų seka, skirta priešprojektinei ir preliminarus projektavimo stadijoms. Pademonstruota technologijos validacija parodė, kad dėl unikalių KFI ir AP metodų savybių sukurtas pastato darnaus sprendinio paieškos algoritmas leidžia jau ankstyvojoje projektavimo stadijoje išgryninti ir suderinti vartotojo poreikius, formalius reikalavimus ir sprendimų teikėjo kompetencijas. Kartu įtrauktos skaitmeninės projektavimo, modeliavimo priemonės sukuria pradinį reikalavimus atitinkantį, energiška funkcionalų pastato koncepcijos projekcinį sprendinį.

3. Atliktas dviejų projektavimo procesų metu suprojektuotų pastatų palyginimas – tradicinio ir IPP taikant sukurtą technologiją. Atvejo analizė parodė, kad remiantis siūloma pastato koncepcijos rengimo technologija ir pagal suformuluotą funkcinį reikalavimą projektuotas pastato apvalkalas buvo energiška efektyvesnis:

- a) nustatyta, kad pirminiu priartėjimu siekiant minimizuoti energijos sąnaudas, šildymo sąnaudos sumažėjo beveik 3 kartus, o vėsinimo sąnaudos sumažėjo beveik ketvirtadaliu;
- b) pritaikyti technologijoje numatyti projektiniai sprendiniai PE sąnaudas sumažino 9 %;
- c) remiantis technologijoje suformuotais ir pritaikytais projektiniais sprendiniais nepageidaujami saulės pritekiai buvo sumažinti nuo 2 iki 4 kartų.

4. Taikant pasiūlytą ir esamame lygyje parengtą technologijos algoritmą reikia naujų kompetencijų ir žmogiškųjų išteklių. Testuojant technologijos algoritmą atskleisti trečiajame žingsnyje galintys susiformuoti nepriklausomybės aksiomos netenkinantys projektiniai sprendiniai, galintys pareikalaus papildomų sprendinio paieškos iteracijų. Kitų galimų trūkumų identifikavimui reikalinga sukaupti kritinę masę informacijos algoritmą taikant praktikoje.

---

## Literatūra ir šaltiniai

Abanda, F. H.; Byers, L. 2016. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling), *Energy* 97, 517–527. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.135>

Adedoyin, A.; Eniolu, T.; Bayode, O. 2014. Effect of tree-shading on energy demand of two similar buildings, *Energy and Buildings* 81, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.046>

Akadiri, P. O.; Olomolaiye, P. O.; Chinyio, E. A. 2013. Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects, *Automation in Construction* 30, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>

Aksamija, A. 2012. BIM-Based Building Performance Analysis: Evaluation and Simulation of De-sign Decisions Integration of BIM-Based Performance Analysis with Design, in *ACEE Conference of Energy Efficiency in Buildings*, 2–3. American Council for an Energy-Efficient Economy, Pacific Grove, CA.

Antuchevičienė, J. 2005. Apleistų pastatų naudojimo modeliavimas darnaus vystymo (-si) aspektu. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika.

Attia, S.; Gratia, E.; De Herde, A.; Hensen, J. L. M. 2012. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design, *Energy and Buildings* 49, 2–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.028>

- Azari, R.; Garshasbi, S.; Amini, P.; Rashed-Ali, H.; Mohammadi, Y. 2016. Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance, *Energy and Buildings* 126, 524–534. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.054>
- Azhar, S.; Carlton, W. A.; Olsen, D.; Ahmad, I. 2011. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis, *Automation in Construction* 20(2), 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.019>
- Babaizadeh, H.; Haghighi, N.; Broun, R.; Asadi, S. 2015. Life cycle assessment of common materials used for exterior window shadings in residential buildings, *Procedia Engineering* 118, 794–801. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.516>
- Balcomb, J. D.; Curtner, A. 2000. A Multi-criteria decision-making process for buildings. Golden, Colorado.
- Ballarini, I.; Corrado, V. 2012. Analysis of the building energy balance to investigate the effect of thermal insulation in summer conditions, *Energy and Buildings* 52, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.004>
- Bank, L.; McCarthy, M.; Thompson, B.; Menassa, C. 2010. Integrating BIM with systems dynamics as a decision-making framework for sustainable building design and operation, in *Proceedings in the First International Conference of Sustainable Urbanisation*. Hong Kong.
- Basbagill, J.; Flager, F.; Lepech, M.; Fischer, M. 2013. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts, *Building and Environment* 60, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>
- Bellia, L.; Cesarano, A.; Iuliano, G.; Spada, G. 2008. Daylight Glare: A Review of Discomfort Indexes, in *Proceedings of CIE 2010 Lighting Quality, visual quality and energy efficiency in indoor lighting: Today for Tomorrow*, Rome, Italy.
- Bernal, L.; Dornberger, U.; Suvelza, A.; Byrnes, T. 2009. Quality Function Deployment (QFD) for Services. SEPT Program Universität Leipzig.
- Bleil de Souza, C. 2012. Contrasting paradigms of design thinking: The building thermal simulation tool user vs. the building designer, *Automation in Construction* 22, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.09.008>
- Bokel, R. M. J. 2007. The Effect of Window Position and Window Size on the Energy Demand for Heating, Cooling and Electric Lighting, in *Building Simulation* (pp. 117–121).
- Brown, C. A. 2005. Teaching Axiomatic Design to engineers – theory, applications, and software, *Journal of Manufacturing Systems* 24(3): 186–195.
- British Standards Institution, 2014. Collaborative production of information – Part 4: full-filling employers information exchange requirements using COBIE – code of practise.
- Burge, S. 2007. Quality Function Deployment (QFD). Technical Paper 0001/sb. <https://www.burgehugheswalsh.co.uk/uploaded/1/documents/a-functional-approach-to-quality-function-deployment-v3.pdf>



Catalina, T.; Virgone, J.; Lordache, V. 2011. Study on the impact of the building form on the energy consumption, *Proceedings of building simulation 2011: 12<sup>th</sup> conference of international performance simulation association*, Sydney (14–16 November 2011), pp. 1726–1729.

Cavique, M.; Gonçalves-Coelho, A. 2009. Axiomatic design and HVAC systems: an efficient design decision-making criterion, *Energy and Buildings* 41: 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.08.002>

Chahadi, Y.; Wäldele, M.; Birkhofer, H. 2007. QFD – a link between customer requirements and product properties, in *International conference of Engineering design*, ICED'07. Paris, France.

Cole, R. J.; Valdebenito, M. J. 2013. The importation of building environmental certification systems: international usages of BREEAM and LEED, *Building Research & Information* 41(6): 662–676.

Crawford, R. H.; Czerniakowski, I.; Fuller, R. J. 2011. A comprehensive model for streamlining low-energy building design, *Energy and Buildings* 43(7), 1748–1756. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.020>

Creative Industries Research Institute. 1994. Quality Function Deployment. [http://www.fme.aegean.gr/sites/default/files/cn/quality\\_function\\_deployment.pdf](http://www.fme.aegean.gr/sites/default/files/cn/quality_function_deployment.pdf)

Danielski, I.; Fröling, M.; Joelsson, A. 2012. The impact of the shape factor on final energy demand in residential buildings in nordic climates, *World Renew. Energy Forum*. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:532979>

Doan, D. T.; Ghaffarianhoseini, A.; Naismith, N.; Zhang, T.; Ghaffarianhoseini, A.; Tookey, J. 2017. A critical comparison of green building rating systems, *Building and Environment* 123, 243–260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>

Dokka, T. K.; Rødsjø, A. 2005. Kyoto Pyramiden. [www.lavenergiboliger.no](http://www.lavenergiboliger.no).

Dussault, J.-M.; Gosselin, L.; Galstian, T. 2012. Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads, *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.016>

Dussault, J.; Gosselin, L. 2017. Office buildings with electrochromic windows: A sensitivity analysis of design parameters on energy performance and thermal and visual comfort, *Energy and Buildings* 153, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.046>

Eisenhower, B.; O'Neill, Z.; Narayanan, S.; Fonoberov, V. A.; Mezić, I. 2012. A methodology for meta-model based optimization in building energy models, *Energy and Buildings* 47, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.001>

Flager, F.; Welle, B.; Bansal, P.; Soremekun, G.; Haymaker, J. 2009. Multidisciplinary Process Integration & Design Optimization of a Classroom Building, *Journal of Information Technology in Construction* 14, 595–612.

Fülöp, J. 2001. Introduction to Decision Making Methods. Hungarian Academy of Science.

Fumo, N.; Mago, P.; Luck, R. 2010. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models, *Energy and Buildings* 42(12), 2331–2337. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.027>

linGeyer, P. 2012. Systems modelling for sustainable building design, *Advanced Engineering Informatics* 26(4), 656–668. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.04.005>

Geyer, P.; Buchholz, M. 2012. Parametric systems modeling for sustainable energy and resource flows in buildings and their urban environment, *Automation in Construction* 22, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.07.002>

Gilbert L. R.; Omar M.; Farid, M. A. 2014. An Integrated QFD and Axiomatic Design methodology for the satisfaction of temporary housing stakeholders, in *the Eight International Conference on Axiomatic Design*, ICAD – 2014.

Gregg D. A. 2016. World Building Design Guide: Windows and Glazing. [žiūrėta 2017 m. spalio 8 d.]. Prieiga per Internetą <<https://www.wbdg.org/resources/windows-and-glazing>>

Goia, F. 2016. Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential, *Solar Energy* 132, 467–492. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.031>

Gonçalves-Coelho, A. M.; Mourão, A. J. F.; Pereira, Z. L. 2005. Improving the use of QFD with Axiomatic Design, *Concurrent Engineering* 13(3): 233–239. <https://doi.org/10.1177/1063293X05056787>

Gosselin, L.; Dussault, J. 2017. Correlations for glazing properties and representation of glazing types with continuous variables for daylight and energy simulations, *Solar Energy* 141, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.031>

Government, N. Z. 2008. *Integrated Whole Building Design Guidelines*.

Gratia, E.; De Herde, A. 2003. Design of low energy office buildings, *Energy and Buildings* 35, 473–491.

Hamdy, M.; Hasan, A.; Siren, K. 2011. Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings, *Building and Environment* 46(1), 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.006>

Han, Y.; Taylor, J. E.; Laura, A. 2017. Exploring mutual shading and mutual reflection inter-building effects on building energy performance, *Applied Energy* 185, 1556–1564. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.170>

Harmathy, N.; Magyar, Z.; Folić, R. 2016. Multi-criterion optimization of building envelope in the function of indoor illumination quality towards overall energy performance improvement, *Energy* 114, 302–317. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.162>

Harmati, N.; Magyar, Z. 2015. Influence of WWR, WG and glazing properties on the annual heating and cooling energy demand in buildings, *Energy Procedia* 78, 2458–2463. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.229>

Hartmann, T.; Van Meerveld, H.; Vossebeld, N.; Adriaanse, A. 2012. Aligning building information model tools and construction management methods, *Automation in Construction* 22, 605–613. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.12.011>

Hee, W. J.; Alghoul, M. A.; Bakhtyar, B.; Elayeb, O.; Shameri, M. A.; Alrubaih, M. S.; Sopian, K. 2015. The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 323–343. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.020>

Heincke, C.; Olsson, D.; Nilsson, C. 2014. Simply Green. Swegon Air Academy.

Heiselberg, P. 2007. Integrated Building Design. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Lecture notes, No. 17.

Hernandez, P.; Kenny, P. 2010. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB), *Energy and Buildings* 42(6), 815–821. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.001>

Hetherington, R.; Robin, L.; Peake, S.; Oldham, D. 2011. Integrated building design, information and simulation modelling: the need for a new hierarchy. In *Building Simulation 2011*, 14–16 November 2011, Sydney, Australia.

Hoffmann, S.; Lee, E. S.; McNeil, A.; Fernandes, L.; Vidanovic, D.; Thanachareonkit, A. 2016. Balancing daylight, glare, and energy-efficiency goals: An evaluation of exterior coplanar shading systems using complex fenestration modeling tools, *Energy and Buildings* 112, 279–298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.009>

Hopfe, C. J. 2009. *Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization* Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven DOI: 10.6100/IR643321

Hundal, M. S. 1997. Systematic mechanical design: a cost and management perspective. New York, NY: ASME Press.

Hutchins, M. 2015. High performance dynamic shading solutions for energy efficiency and comfort in buildings. Executive summary. Abingdon, UK: ES-SO.

Ichinose, T.; Lei, L.; Lin, Y. 2017. Impacts of shading effect from nearby buildings on heating and cooling energy consumption in hot summer and cold winter zone of China, *Energy and Buildings* 136, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.064>

Irizarry, J.; Karan, E. P.; Jalaei, F. 2013. Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management, *Automation in Construction* 31, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.005>

Iwata, T.; Taniguchi, T.; Sakuma, R. 2017. Automated blind control based on glare prevention with dimmable light in open-plan offices, *Building and Environment* 113, 232–246. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.034>

Kahraman, C.; Cebi, S. 2009. A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process, *Energy* 34(10), 1603–1616. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.008>

- Kanagaraj, G.; Mahalingam, A. 2011. Designing energy efficient commercial buildings a systems framework, *Energy and Buildings* 43(9), 2329–2343. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.023>
- Kesik, J. 2016. World Building Design Guide: Building enclosure design principles and strategies. [žiūrėta 2017 m. gruodžio 9 d.]. Prieiga per Internetą: <<https://www.wbdg.org/resources/building-enclosure-design-principles-and-strategies>>
- Khin, A.; Lau, K.; Salleh, E.; Lim, C. H.; Sulaiman, M. Y. 2016. Potential of shading devices and glazing configurations on cooling energy savings for high-rise office buildings in hot-humid climates: The case of Malaysia, *International Journal of Sustainable Built Environment* 5(2), 387–399. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.04.004>
- Kiatake, M.; Petreche, J.R.D. 2017. A case study on the application of the theory of inventive problem solving in architecture. *Architectural Engineering and Design Management*, 8:2, 90–102, DOI: 10.1080/17452007.2012.659504
- Kim, J.; Yi, Y. K.; Malkawi A. M. 2011. Building form optimization in early design stage to reduce adverse wind condition – using computational fluid dynamics, in *12<sup>th</sup> Conference of International Building Performance Simulation Association*, 1, 785–791. Sydney.
- Kim, S.; Zadeh, P. A.; Staub-French, S.; Froese, T.; Cavka, B. T. 2016. Assessment of the Impact of Window Size, Position and Orientation on Building Energy Load Using BIM, *Procedia Engineering* 145, 1424–1431. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.179>
- Kirimtat, A.; Kundakci, B.; Chatzikonstantinou, I.; Sariyildiz, S. 2016. Review of simulation modeling for shading devices in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 23–49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>
- Kneifel, J. 2010. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings, *Energy and Buildings* 42(3), 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.011>
- Kolokotsa, D.; Diakaki, C.; Grigoroudis, E.; Stavrakakis, G.; Kalaitzakis, K. 2009. Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings, *Advances in Building Energy Research* 3(1), 121–146. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0305>
- Kontoleon, K. J.; Zenginis, D. G. 2017. Analysing Heat Flows Through Building Zones in Aspect of their Orientation and Glazing Proportion, under Varying Conditions, *Procedia Environmental Sciences* 38, 348–355. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.100>
- Koo, C.; Park, S.; Hong, T.; Park, H. S. 2014. An estimation model for the heating and cooling demand of a residential building with a different envelope design using the finite element method, *Applied Energy* 115, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.014>
- Krizmane, M.; Slihte, S.; Borodinecs, A. 2016. Key criteria across existing sustainable building rating tools, *Energy Procedia* 96 (October), 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.107>
- Larsson, N. 2009. The Integrated Design Process; History and Analysis, *International Initiative for a Sustainable Built Environment (IiSBE)*, 1–16.

Larsson, N.; Poel, B. 2003. Solar Low Energy Buildings and the Integrated Design Process – An Introduction, IEA SHC Task 23 Optimization of Solar Energy Use in Large Buildings. Available from <http://www.iea-shc.org/task23/>

Lee, C.; Won, J. 2017. Analysis of combinations of glazing properties to improve economic efficiency of buildings, *Journal of Cleaner Production* 166, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.024>

Li, L.; Qu, M.; Peng, S. 2016. Performance evaluation of building integrated solar thermal shading system: Building energy consumption and daylight provision, *Energy and Buildings* 113, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.040>

Gilbert, L. R.; Omar, M. A.; Farid, A. 2016. Axiomatic design in large systems: an application of qua-lity function deployment and axiomatic design to the conceptual design of temporary housing sta-keholders. Springer, 216–240.

Leleikienė, D. 2015. Kokybės funkcijos išskleidimo metodo taikymas internetinių svetainių kokybės gerinimui. Magistro darbas, Vilniaus universitetas. Vilnius.

Loukaidou, K.; Michopoulos, A.; Zachariadis, T. 2017. Nearly-Zero Energy Buildings: Cost-Optimal Analysis of Building Envelope Characteristics, *Procedia Environmental Sciences* 38, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.069>

Luther, M. B.; Cheung, C. K. 2003. High performance low-energy buildings, in Destination renewables : from research to market, in *Proceedings 41<sup>st</sup> annual conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society*, Australian and New Zealand Solar Energy Society, Maroubra, N.S.W. (pp. 88–95).

Marchesi, M.; Alessandro, I. 2015. Addressing the adaptive customization of timber prefabricated housing through Axiomatic Design, *Procedia CIRP* 34, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.05.001>

Martinopoulos, G. 2018. Life Cycle Assessment of solar energy conversion systems in energetic retrofitted buildings, *Journal of Building Engineering*, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.027>

Matthew, R.; Mourshed, M. 2015. Low carbon buildings: Sensitivity of thermal properties of opaque envelope construction and glazing, *Energy Procedia* 75, 1284–1289. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.189>

Meerbeek, B. W.; de Bakker, C.; de Kort, Y. A. W.; van Loenen, E. J.; Bergman, T. 2016. Automated blinds with light feedback to increase occupant satisfaction and energy saving, *Building and Environment* 103, 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.002>

Merritt, F.; T.Ricketts, J. 2000. Building Design and Construction Handbook, McGraw-Hill Professional.

Méndez Echenagucia, T.; Capozzoli, A.; Cascone, Y.; Sassone, M. 2015. The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy perfor-mance analysis, *Applied Energy* 154, 577–591. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.090>

- Migilinskas, D.; Popov, V.; Juocevicius, V.; Ustinovichius, L. 2013. The Benefits, Obstacles and Problems of Practical Bim Implementation, *Procedia Engineering* 57, 767–774. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.097>
- Mora, R.; Bitsuamlak, G.; Horvat, M. 2011. Integrated life-cycle design of building enclosures, *Building and Environment* 46(7), 1469–1479. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.018>
- Motuziene, V. 2010. Įstiklinimo įtakos viešųjų pastatų energijos poreikiams kompleksinė analizė. Vilnius: Technika.
- Negendahl, K.; Nielsen, T. R. 2015. Building energy optimization in the early design stages: a simplified method, *Energy and Buildings* 105, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.087>
- Nguyen, A.-T.; Reiter, S.; Rigo, P. 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Applied Energy* 113, 1043–1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>
- Nowak, L.; Sliwin, E. 2016. The impact of different solar passive systems on energy saving in public buildings and occupants' thermal and visual comfort, *Journal of Building Physics* 40(2), 177–197. <https://doi.org/10.1177/1744259115597705>
- Ochoa, C. E.; Aries, M. B. C.; van Loenen, E. J.; Hensen, J. L. M. 2012. Considerations on de-sign optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort, *Applied Energy* 95(31).
- Oka, H.; Tamura, T.; Miura, Y.; Teki, Y. 2001. Synthesis and characterization of poly (1,3-phenylene) based polyradicals carrying cyclic aminoxyls, *Journal of Materials Chemistry* 11(5), 1364–1369. <https://doi.org/10.1039/b100060h>
- Ordoñez, A.; Carreras, J.; Korolija, I.; Zhang, Y.; Coronas, A. 2014. Impact of building geometry on its energy performance depending on climate zones Grupo de Ingeniería Térmica Aplicada, Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, España Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University, Leicester.
- Østergård, T.; Jensen, R. L.; Maagaard, S. E. 2016. Building simulations supporting decision making in early design – a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61, 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.045>
- Pacheco, R.; Ordóñez, J.; Martínez, G. 2012. Energy efficient design of building: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(6), 3559–3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>
- Pajaujis, V.; Motuzienė, V. 2017. Pastato dinaminio energinio modeliavimo įrankių lyginamoji analizė, *Mokslas – Lietuvos Ateitis* (2014), 442–450. <https://doi.org/https://doi.org/10.3846/mla.2017.1051>
- Park, G. J. 2007. 2 Axiomatic Design. In *Analytic Methods for Design Practice*. Springer.
- Parasonis, J.; Keizikas, A.; Endriukaitytė, A.; Kalibatienė, D. 2012. Architectural Solutions to Increase the Energy Efficiency of Buildings, *Journal of Civil Engineering and Management* 18:1, 71–80 <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2011.652983>

- Peuportier, B.; Thiers, S.; Guiavarch, A. 2013. Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment, *Journal of Cleaner Production* 39, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.041>
- Podvezko, V. 2012. Dominuojančiųjų alternatyvų daugiakriteriniai metodai. *Liet. mat. rink. LMD darbai*, 53:96–101.
- Pohekar, S. D.; Ramachandran, M. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustain-able energy planning – a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8(4), 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- Prowler, D. 2016. World Building Design Guide: Sun Control and Shading Devices. [žiūrėta 2017 m. spalio 9 d.]. Prieiga per Internetą: <<https://www.wbdg.org/resources/sun-control-and-shading-devices>>
- Punjabi, S. A. 2005. Development of an Integrated building design information interface, in: *IBP-SA'05 Buildings Simulation Conference*, Montreal.
- Raji, B.; Tenpierik, M. J.; van den Dobbelsteen, A. 2015. An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: a case study in the Netherlands, *Energy and Buildings* 124, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.049>
- Raslanas, S.; Stasiukynas, A.; Jurgelaitytė, E. 2013. Sustainability Assessment Studies of Recreational Buildings, *Procedia Engineering* 57, 929–937. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.118>
- Rieksti, R. 2011. Building energy and architectural form relationships. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania*, 3 (Jun. 2011), 67–71. <https://doi.org/10.3846/mla.2011.053>
- Romani, Z.; Draoui, A.; Allard, F. 2015. Metamodeling the heating and cooling energy needs and simultaneous building envelope optimization for low energy building design in Morocco, *Energy and Buildings* 102, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.014>
- Sabaei, D.; Erkoyuncu, J.; Roy, R. 2015. A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery, *Procedia CIRP* 37, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.086>
- Sadineni, S. B.; Madala, S.; Boehm, R. F. 2011. Passive building energy savings: A review of building envelope components, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(8), 3617–3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>
- Sandanayake, M.; Zhang, G.; Setunge, S. 2019. Estimation of environmental emissions and impacts of building construction – A decision making tool for contractors, *Journal of Building Engineering* 21 (March 2018), 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.10.023>
- Šaparauskas, J. 2008. Automated evaluation of alternative solutions of building design, in *Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ASARC-2008)*, 26–29 June, 2008, Vilnius, Lithuania, pp. 507–514
- Sawaguchi, M.; Shintaro, I. V.; Izumi, H. 2015. Effectiveness of conceptual design process respecting “The Axiomatic Design Theory”, *Procedia Engineering* 131: 1050–1063. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.423>

- Schade, J.; Olofsson, T.; Schreyer, M. 2011 Decision-making in a model-based design process, *Construction Management and Economics* 29: 4, 371–382.
- Shahi, M.; Alipour, A. 2016. Integration Axiomatic Design with Quality Function Deployment and Sustainable design for the satisfaction of an airplane tail stakeholders, *Procedia CIRP* 53, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.102>
- Simanavičienė R. 2011. Kiekybinių daugiatislių sprendimo priėmimo metodų jautrumo analizė, *Daktaro disertacija*. Vilnius: Technika.
- Singgih, M. L.; Trenggonowati, D. L.; Karningsih, P. D. 2013. Four phases Quality Function Deployment (QFD) by considering KANO concept, time and manufacturing cost, in *the 2<sup>nd</sup> International Conference of Engineering and Technology Development, ICETD 2013*, Indonesia.
- Singhaputtangkul, N.; Low, S. P.; Teo, A. L.; Hwang, B. 2013. Automation in Construction Knowledge-based Decision Support System Quality Function Deployment (KBDSS-QFD) tool for assessment of building envelopes, *Automation in Construction* 35, 314–328. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.017>
- System Design [interaktyvus] 2018. Application of Axiomatic Design. [žiūrėta 2018 m. sausio 8 d.]. Prieiga per Internetą <<http://www.sysdesign.org/msdd/axiomaticdesign.htm>>
- Song, S.; Yang, J.; Kim, N. 2012. Development of a BIM-based structural framework optimization and simulation system for building construction, *Computers in Industry* 63(9), 895–912. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.08.013>
- Suh, N. P. 2003. A theory of Complexity and Applications. Oxford University Press.
- Susorova, I.; Tabibzadeh, M.; Rahman, A.; Clack, H. L.; Elnimeiri, M. 2013. The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings, *Energy and Buildings* 57, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>
- Thalfeldt, M.; Pikas, E.; Kurnitski, J.; Voll, H. 2013. Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate, *Energy and Buildings* 67, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.027>
- Thalfeldt, M.; Pikas, E.; Kurnitski, J.; Voll, H. 2017. Window model and 5 year price data sensitivity to cost-effective façade solutions for office buildings in Estonia, *Energy* 135, 685–697. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.160>
- Timothy, J.; Harðardóttir, S. 2016. Creative Axiomatic Design, *Procedia CIRP* 50, 240–245. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.116>
- Towner, Jr.; W. T. 2013. The Design of Engineering Education as a Manufacturing System. Prieiga per Internetą: <<https://www.digitalcommons.wpi.edu/etd-dissertations/151>>
- Tsikra, P.; Andreou, E. 2017. Investigation of the Energy Saving Potential in Existing School Buildings in Greece. The role of Shading and Daylight Strategies in Visual Comfort and Energy Saving, *Procedia Environmental Sciences* 38, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.107>



Tulevech, S. M.; Hage, D. J.; Jorgensen, S. K.; Guensler, C. L.; Himmler, R.; Gheewala, S. H. 2018. Life cycle assessment: a multi-scenario case study of a low-energy industrial building in Thailand, *Energy and Buildings* 168, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.011>

Turrin M., Buelow V., Stouffs R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4): pp.656–675.

Turk, S.; Addin Quintana, S. N. S.; Zhang, X. 2018. Life-cycle analysis as an indicator for impact assessment in sustainable building certification systems: the case of Swedish building market, *Energy Procedia* 153, 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.025>

Tzempelikos, A.; Athienitis, A. K.; Karava, P. 2007. Simulation of façade and envelope design options for a new institutional building, *Solar Energy* 81(9), 1088–1103. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.02.006>

Ustinovičius, L. Statybos investicijų efektyvumo nustatymo sprendimų paramos sistema. Habilitacinis darbas. Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T). Vilnius: „Technika“, 2003.

Valančius, K.; Vilutienė, T.; Rogoža, A. 2018. Analysis of the payback of primary energy and CO2 emissions in relation to the increase of thermal resistance of a building, *Energy and Buildings* 179, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.037>

Valladares-rendón, L. G.; Schmid, G.; Lo, S. 2017. Review on energy savings by solar control techniques and optimal ade shading building orientation for the strategic placement of fac systems, *Energy and Buildings* 140(71), 458–479. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.073>

Watson, A. 2011. Digital buildings – Challenges and opportunities, *Advanced Engineering Informatics* 25(4), 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.003>

Gerber, D. J.; Eve Lin, S.-H. 2014. Designing in complexity: Simulation, integration, and multi-disciplinary design optimization for architecture, *SIMULATION* 90(8), 936–959. <https://doi.org/10.1177/0037549713482027>

Wen, L.; Hiyama, K. 2016. A Review: Simple Tools for Evaluating the Energy Performance in Early Design Stages, *Procedia Engineering* 146, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.349>

Yamashina, H.; Ito, T.; Kawada, H. 2017. Innovative product development process by integrating QFD and TRIZ, *International Journal of Production Research* 40(5): 1031–1050. <https://doi.org/10.1080/00207540110098490>

Ye, Y.; Xu, P.; Mao, J.; Ji, Y. 2016. Experimental study on the effectiveness of internal shading devices, *Energy and Buildings* 111, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.040>

Yun, G.; Yoon, K. C.; Kim, K. S. 2014. The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings, *Energy and Buildings* 84, 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.040>

Zavadskas, E.; Kaklauskas, A. 1996 (a). Pastatų sistemotechninis įvertinimas. Vilnius: Technika, 1996. 275 p.

Zavadskas, E. K.; Kaklauskas, A. 1996 (b). Determination of an efficient contractor by using the new method of multicriteria assessment. In Langford, D. A.; Retik, A. (Eds.) International Symposium for "The Organisation and Management of Construction". Shaping Theory and Practice: Managing the Construction Project and Managing Risk. CIB W 65; London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras. – London: E and FN SPON: 94–104

Zavadskas, E. K.; Antucheviciene, J.; Šaparauskas, J.; Turskis, Z. 2013. Multi-criteria Assessment of Facades' Alternatives: Peculiarities of Ranking Methodology, *Procedia Engineering*, 57, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.016>

Zavadskas, E. K.; Peldschus, F.; Turskis, Z. 2008. Multi-criteria optimization software LEVI-4.0 a tool to support design and management in construction. *The 25<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. ISARC-2008, 731–736. <https://doi.org/10.3846/isarc.20080626.731>

Zavadskas, E. K.; Turskis, Z. 2011. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in eco-nomics: an overview, *Technological and Economic Development of Economy* 17(2), 397–427. <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>

Zhang, Y.; Tindale, A.; Garcia, A. O.; Korolija, I.; Tresidder, E. G.; Passarelli, M.; Gale, P. 2013. How to integrate optimization into building design practise: lessons learnt from a design optimization competition. In: *13<sup>th</sup> Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France.

Zhang, L.; Li, Y.; Stephenson, R.; Ashuri, B. 2018. Valuation of energy efficient certificates in buildings, *Energy and Buildings* 158, 1226–1240. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.014>

Zhang, S.; Teizer, J.; Lee, J.-K.; Eastman, C. M.; Venugopal, M. 2012. Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules, *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006>

Zhu, A.; He, S.; He, D.; Liu, Y. 2016. Conceptual design of customized limb exoskeleton rehabilitation robot based on Axiomatic Design, in *The 10<sup>th</sup> International Conference on Axiomatic Design*, ICAD – 2016, 219–224. Amsterdam: Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.010>

World Building Design Guide. 2016. Engage the Integrated Design Process. [žiūrėta 2017 m. spalio 10 d.]. Prieiga per Internetą: <<https://www.wbdg.org/design-objectives/aesthetics/engage-integrated-design-process>>

Ларичев, О. Свойства методов принятия решений в многокритериальных задачах индивидуального выбора. Автоматика и телемеханика, No 2, 2002, с. 146–158.

---

## Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

### Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Motuzienė V.; Rogoža, A.; Lapinskienė, V.; Vilitienė, T. 2016. Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: a case study. *Journal of cleaner production*. Oxford: Elsevier Sci Ltd. ISSN 0959-6526. Vol. 112, Part. 1 (2016), p. 532–541.

Džiugaitė-Tumėnienė, R.; Lapinskienė, V. 2014. The Multicriteria Assessment Model of an Energy Supply System of a Low Energy House, *Engineering Structures and Technologies* 6(1): 33–41.

Lapinskienė, V.; Martinaitis, V. 2017. The development of conceptual building design technology, using quality function deployment and axiomatic design. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija = Science – Future of Lithuania: Environmental protection engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 9, Nr. 4 (2017), p. 462–469.

### Straipsniai kituose leidiniuose

Lapinskienė, V.; Martinaitis, V. 2013. The framework of an optimization model for building envelope. *Procedia Engineering. 11<sup>th</sup> international conference on modern building materials, structures and techniques (MBMST)*, May 16–17, 2013, Vilnius, Lithuania. Amsterdam: Elsevier Science Ltd. ISSN 1877-7058. Vol. 57 (2013), p. 670–677.

Lapinskienė, V.; Motuzienė, V.; Džiugaitė-Tumėnienė, R.; Mikučionienė, R. 2017. Impact of internal heat gains on building's energy performance. *10<sup>th</sup> international conference „Environmental engineering“*, April 27–28, 2017, Vilnius, Lithuania: selected papers. Vilnius: VGTU Press, 2017, p. 1–7.

Lapinskienė, V.; Motuzienė, V.; Martinaitis, V. 2014. Multi-objective optimization of shading solutions for a standard family house under Lithuanian conditions. *9<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering“*, May 22–23, 2014, Vilnius, Lithuania: selected papers. Vilnius: Technika, 2014. ISBN 9786094576409, p. 1–7.

Valančius, V.; Lapinskienė, V. 2014. Vilūnė. Heat gains utilisation and system efficiency influence to the heat demand of a building heating. *9<sup>th</sup> International Conference „Environmental Engineering“*, May 22–23, 2014, Vilnius, Lithuania: selected papers. Vilnius: Technika, 2014. ISSN 2029-7092, p. 1–6.

Lapinskienė, V.; Paulauskaitė, S.; Martinaitis, V. 2013. Оценка рациональности альтернативных решений при оптимизации архитектурно-конструктивной части здания. *Пятая международная научно-техническая конференция „Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции“*, 20–22 ноября 2013 г., сборник докладов = The 5<sup>th</sup> international scientific and technical forum, Theoretical foundation of heat and gas supply and ven. Москва: МГСУ, 2013, p. 390–396.

---

# Summary in English

## Introduction

### Formulation of the problem

The European Union (hereinafter referred to as EU) policy objectives set new priorities in the building sector, promoting sustainable and optimized design and construction processes.

Modern design, modelling and analysis tools penetrate the building/design market, thus, changing the traditional design process and leading to the continuous search for new, more carefully developed solutions. As a result of the stricter EU requirements, increasing project scope, a number of participants involved and technological progress, the design process becomes more complex. Furthermore, the process of optimization and decision-making becomes a challenge for designers, as solutions need to be assessed, according to a number of hardly compatible criteria: energy efficiency, environmental impact, indoor climate parameters, price, etc.

Meanwhile, the architectural-structural solutions in the traditional design process were and often are one-sided to achieve the aesthetic view. The possible variations are changed intuitively – based on the experience of an architect. This means that the technical systems need to be adapted to the already adopted architectural solutions, thus, increasing the power of the engineering systems, investments, and leading to a largely inefficient design process. Importantly, the later fails to meet the customer's expectations and the main requirements.

The dissertation intends to introduce the concept building design technology, which would significantly reduce the number of drawbacks of the traditional building design,

identified in the empirical research, and would ensure the solution, oriented towards the initial requirements.

### **Relevance of the thesis**

The European Commission (hereinafter referred to as EC) emphasized that reducing energy waste and improving energy efficiency is a strategic priority for the EU. The aim is not only to address the climate change and environmental issues, but also to reduce the energy dependency.

In the EU, buildings are responsible for more than 40% of the final energy consumption and 35% of CO<sub>2</sub> emissions. The European Parliament has acknowledged that the building sector should be a key element of the EU plan to reduce energy consumption by 80% by 2050, compared to 2010. On the basis of this, the EU has committed to reduce the energy consumption by 20% already by 2020. This implies increasingly stricter requirements for newly built or renovated buildings at national level and a substantially different design and construction process.

Practice shows that the traditional building design process is no longer effective and that it becomes increasingly difficult to meet the requirements, however, the Integrated Building Design (IBD) is a complex, multifaceted process that at least now requires a continuous improvement.

The thesis presents the conceptual building design technology, which integrates the Quality Function Deployment (hereinafter referred to as QFD) and the Axiomatic Design (hereinafter referred to as AD) – the methods, well known in the common engineering. Due to unique features, they allow to mobilize the IBD team, to define the requirements of both a customer and a team at the very first design stages, to identify the technical indicators, their correlation early enough, and, thereby, to ensure the final solution, oriented towards the initial requirements.

### **The object of research**

The object of the research – the process of conceptual building design in the integrated building design.

### **The aim of the thesis**

To develop a sequence of conceptual building design procedures, where the methods and tools would allow for a more efficient search for the energy-functional design solution of concept building design, combining the initial requirements of a user and the competences of a design team.

### **The objectives of the thesis**

In order to achieve the aim of the thesis, the following objectives are set:

1. To assess the importance of sustainable building design solutions for energy functionality and the significance of application of the principles of Integrated Building Design.
2. To identify the methods that assess and match the customer's needs, official requirements and capabilities of a solution provider. To assess the possibilities of integrating the methods in the building design process.

3. To develop a detailed sequence of procedures for searching for a sustainable solution by adapting and integrating the selected methods and tools for building design, modelling, and for matching the expectations of a customer and the capabilities of a design team.
4. To verify the efficiency of the developed sustainable solution search algorithm for the search of an energy-functional solution. To compare the obtained results with the solution, obtained during traditional building design process.

### **Research methodology**

In order to elaborate and identify the problem, the scientific analysis in the thesis, systematization, comparison and generalization of scientific sources were carried out. The thesis is based on both quantitative and qualitative research methods. The applied method of empirical research – survey – allowed to confirm the problems raised in the thesis.

Following the method of synthesis, the methods of Quality Function Deployment and Axiomatic Design, well-known in other engineering fields, were integrated. In addition, the multi-criteria decision-making method COPRAS and the building life cycle analysis were incorporated into the developed technology.

Case study and systemic analysis, comparison, interpretation, and graphical representation of data were used to demonstrate the efficiency of technology.

Revit and DesignBuilder were used for development of a digital architectural model and for energy modelling.

### **Scientific novelty of the thesis**

The following results, new to the civil engineering, were obtained in the course of the dissertation:

1. This thesis presents the conceptual building design technology, developed by the author, which is first to combine the methods of Quality Function Deployment (QFD) and Axiomatic Design (AD), used in other engineering fields, as well as the modern modelling and design tools.
2. QFD and AD, integrated in the technology, which was developed by the author, are rarely applied in the building design process whether individually or together and have not been used in the Integrated Building Design (IBD) process so far. The properties of these methods lead to a combination of IBD-favourable procedures and tools, significantly reducing the main drawbacks of traditional building design.
3. QFD and AD integration helps to define and match the design priorities, to develop hierarchical systems of functional requirements and design parameters, allowing for faster and more efficient development of the solution, oriented towards initial requirements.
4. The procedures of the developed technology are universal, i.e., by selecting appropriate design and modelling tools, QFD and AD methods can address not only energy functionality, but also other aspects of concept building design (environmental impact, economical and etc.).

### **Practical value of the research findings**

The presented technology allows for a smoother process of a building design, where the requirements of the project participants are more clearly identified and matched for the sustainability of the building and its systems as a whole.

The used digital design and modelling tools ensure a productive and quantitatively controlled Integrated Building Design process at an early stage. At the same time, this could be an impetus for the artificial intelligence to join the building design.

### **The defended statements**

1. More effective application of IBD principles in building information modelling and search for energy functionality solutions requires more algorithmic procedures, and the methods of their formalization.
2. The combination of Quality Function Deployment (QFD) and Axiomatic Design (AD) is considered as effective for identifying and matching the user expectations in design, and for developing the corresponding engineering solutions.
3. The level of structuring and formalization of QFD and AD methods allows to adapt the level of algorithmization, acceptable for building information modelling (BIM technology), to reach the building design purposes.

### **Approval of the research results**

The subject of the dissertation is published in 8 articles: 1 is in the collection of articles included in the list of Clarivate Analytics Web of Science, 3 in the conference materials listed in the Proceedings database, 2 in the magazine cited in the Inspec database, 2 in the reviewed international conference materials

The results of the research, carried out in the dissertation, were presented at four scientific conferences in Lithuania and abroad:

1. International conference “*Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции*”, 2013 Moscow;
2. International conference “*Modern Building Materials, Structures and Techniques*” 2013, Vilnius;
3. International conference “*Environmental Engineering*” 2014, Vilnius;
4. International conference “*Environmental Engineering*” 2017, Vilnius.

### **The structure of the thesis**

The dissertation consists of an introduction, three chapters and general conclusions. There are three annexes in the dissertation.

The volume of the paper is 128 pages, excluding annexes. There are 10 numbered formulas, 38 figures and 19 table in the thesis. 150 literature references were used for dissertation.

## **1. Overview of the characteristics and methods of the design of building and its energy functionality**

The first chapter reviews the scientific literature, related with building design. It discusses the building design methods, modern digital design, modelling and optimization tools,



passive design strategies, and the ways to increase the efficiency of different architectural – structural combinations of the building envelope.

The analysis of the literature revealed that the building development/design process has been significantly changing due to increasingly strict EU requirements for energy and climate change stabilization, technological dynamics, increased project scope and project groups. This chapter details the Integrated Building Design (IBD) and the importance of its application at the early design stage. Furthermore, it reviews the most popular design/modelling tools and the significance of BIM technology for the newly designed buildings.

The comparison of IBD and traditional design processes revealed the differences between participants, course and processes, identified the difficulties of traditional building design and their causes. Although the principles of the Integrated Building Design (IBD) and the digital design (BIM technology) tools are important factors of a modern building design, the interaction between energy efficiency, IBD and BIM is still a major challenge in the building design process.

Under the conditions of a liberal market, the number of different groups, involved in the design, is growing, as well as the need to match their interests, to identify them at an early design stage. It becomes difficult to optimize different contradictory criteria, related to the building design, thus, not only the design becomes more complicated, but the search for solution becomes far from optimal one.

Namely, the building envelope, its architectural, structural solutions – orientation, compactness, glazing area, etc. – are one of the most important and most widely studied optimization directions in the building design. This chapter re-views the passive energy design strategies that allow to develop more energy efficient architectural solutions with minimal means.

The review of the design methods, applied in common engineering, identified two methods – Quality Function Deployment and Axiomatic Design – the application of which in the building design is expected to result in the process and outcome that is more in line with the customers' interests. It was found out that application of these methods together would allow to reduce the number of drawbacks of traditional building design.

## **2. The suggested technology of concept building design**

This chapter aims to present the developed sustainable solution search algorithm, where the integrated methods of Quality Function Deployment and Axiomatic Design allow to eliminate the main drawbacks of traditional building design and to combine all IBD teams from the very first stages of the building design.

The survey demonstrated that the traditional building design process is characterized by fundamentally different interests of architects and customers, i.e., aesthetics is more relevant to architects, while price and time costs – for customers. However, the building design also involves other teams – engineers, who, according to the EU requirements, have to pay much attention to energy efficiency and environmental impact. If these groups do not cooperate, it is difficult to meet the aforementioned requirements. The engineers adapt the engineering systems to the existing architectural solutions, thus, increasing the system power, energy consumption and costs. With the possibilities for IBD teams to cooperate at the early stage of design, the digital design and modelling tools can optimize and assess

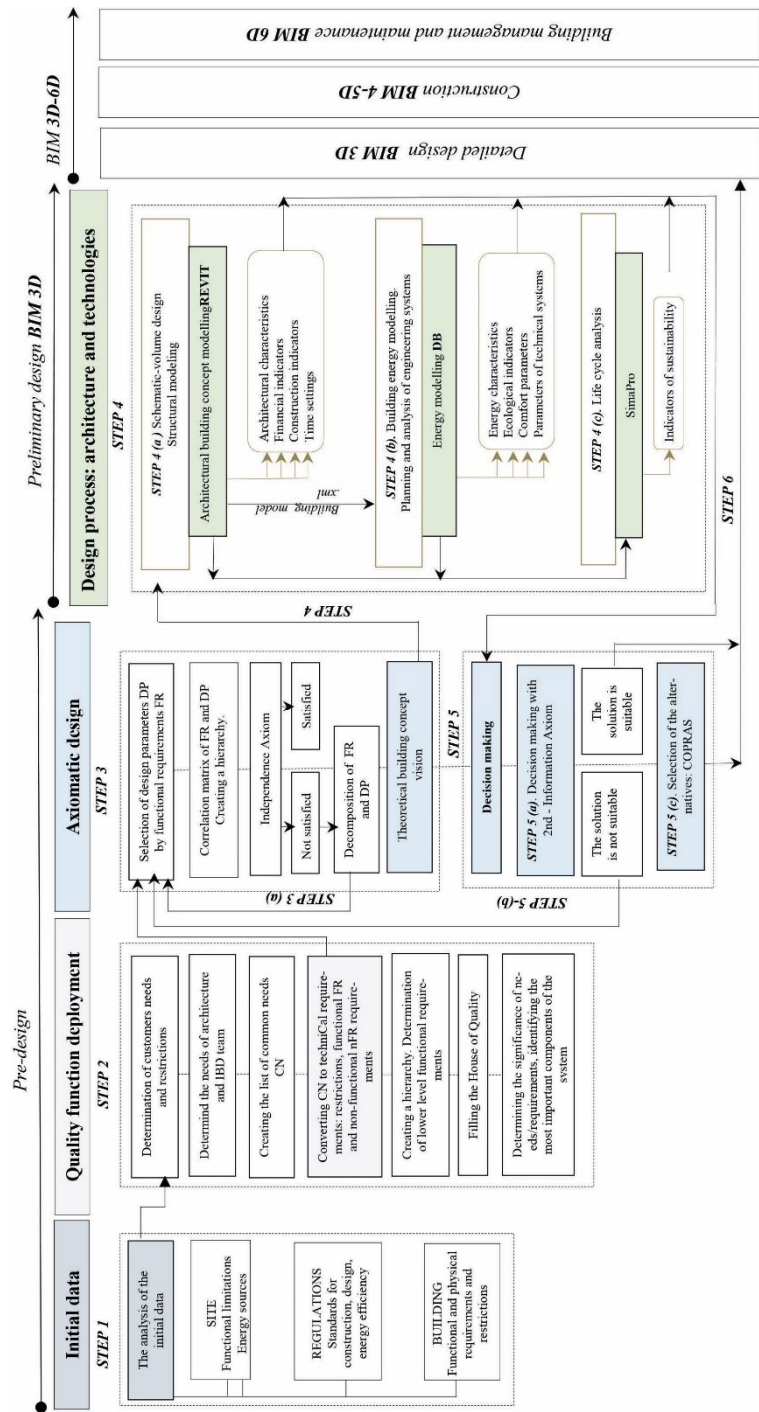


Fig. S.2.1. Detailed scheme of Conceptual Building Design Technology (Composed by the author)

the financial, energy, ecological and other criteria. Therefore, the application of this technology for the concept building design allows for a faster and more effective search for the solution, which is oriented towards the initial requirements.

The building sustainable solution search algorithm (Figure S.2.1) consists of 6 key steps, which involve the whole Integrated Building Design (IBD) team, a customer and a project consultant. Each of these steps is presented in details.

STEP 1 – the analysis of initial data. Having the main task (purpose of the project and purpose of the intended building), all groups participating in the project are individually acquainted with the existing site location, possible physical and functional restrictions of the building and plot, normative documents.

STEP 2 – the determination/compatibility of customers and IBD team needs using the House of Quality (Quality Function Deployment). The main goal of this step is to identify and rank the most important project requirements (criteria), identify possible limitations and prepare engineering parameters to create the design concept. It is suggested, that the whole IBD team and the customer should participate together in the project from the first steps.

The design facilitator prepares a questionnaire at this step, where all participants identify their expectations, requirements and needs for the project. Once the list is made, the customer has the right to rank these requirements. Design facilitator, if necessary – in collaboration with IBP team – transforms these expectations into technical parameters: constraints, functional and non-functional parameters.

Following the algorithm, the matrices of House of Quality should be filled, determining which functional requirement is the most important, how the technical parameters interact with each other. Mapping two domains – moving from customer domain to functional domain. This information will be important and informative at a later step in order to find to initial needs orientated design solution.

STEP 3 – development of building design concept, using the Axiomatic design principles. Here, the Axiomatic design consists of two parts (STEP 3 and STEP 5a). STEP 3 moves from the functional domain to the physical domain – zigzagging to decompose functional requirements (FR) and design parameters (DP) hierarchies. Each design parameter must satisfy the Independence Axiom. Disregarding this axiom, the division of the current level FR and DP is performed and goes to (STEP 5 (a)), where the selection of the design parameters DP according to FR is performed again.

The lowest level design parameters of hierarchical schemes indicate the solutions (engineering parameters) that should be used developing the theoretical vision of the building concept. The design facilitator, if necessary, including members of the IBD team, creates these parameter hierarchies. Considering these solutions, the architect creates a theoretical concept design vision that is designed/modelled in the next step.

STEP 4 – building architecture modelling. It is suggested, that firstly architectural modelling should be performed (STEP 4 (a)), and later, depending on the criteria that has to be found, energy modelling (STEP 4 (b)) or Building LCA (STEP 4 c). This means that in the early stage of building design there is a possibility to check the effectiveness of the adopted architectural solutions and their impact on energy, ecology and other parameters.

According to the design parameters provided in STEP 3 and the theoretical concept building design vision, the building is modelled with architectural design tool (e.g. Revit).

Having a number of design solutions, their energy functionality is checked in energy modelling tool (e.g. DesignBuilder). Energy modelling must be carried out by energy engineers, while data for decision making is prepared by the design facilitator. The technology algorithm indicates that an automatic data transportation of the building model from the Revit to DesignBuilder is possible.

If it was identified, that the building concept should satisfy the certain characteristics of LCA – this analysis could be made and the certain indicators set using LCA software (e.g. Simapro). This is the responsibility of design facilitator. This analysis may require input/output data from architecture and energy modelling.

STEP 5 – decision making. There are two possible situations here: when specific numerical meanings of the solutions are provided in the initial stages of the project – the aim is to find solution that most closely matches them (for example – specific energy consumption). In the second case, the goal is to find the best alternative, according to the initial requirements of the whole IBD team, identified in the first stages of the project.

In the first case – the Information Axiom is used (STEP 5 (a)). Information Axiom states that the solution with the highest probability can be considered as the best solution. If solution is suitable – proceed in detailed design step (STEP 6). If solution is not suitable (STEP 5 (c)), it is suggested to return to adjust the hierarchical design parameter schemes for the design concept. This remains the responsibility of the design facilitator, so the modified scheme should be transferred to the architect. The process is repeated.

Having several already modelled alternative solutions and necessary criteria values, the best option can be selected according to the COPRAS decision-making method (STEP 5 (b)). The design facilitator according to the initial project requirements (criteria) identified in (STEP 2) should do this.

The approved results are presented to the architect and leads to the detailed design stage (STEP 6).

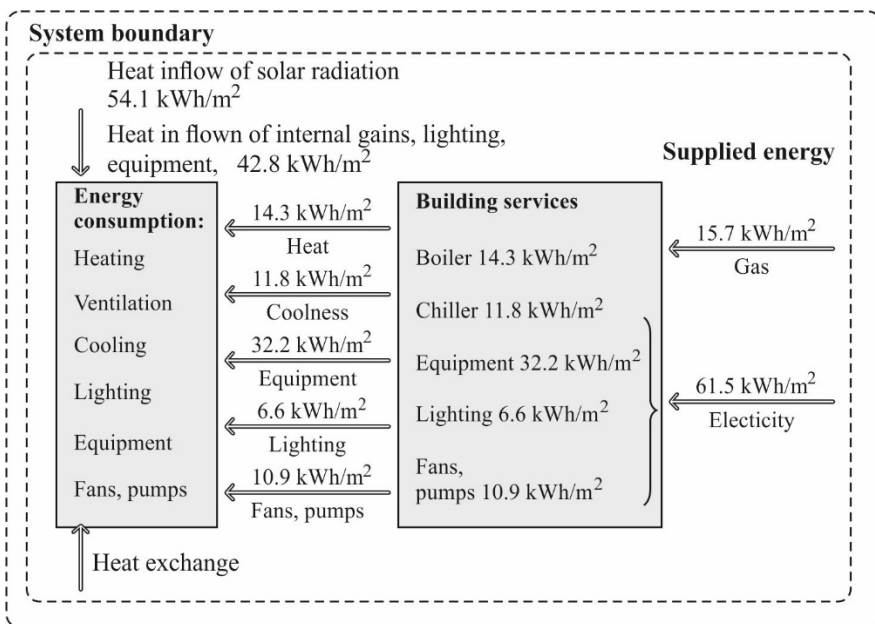
### **3. Application of the technology of concept building design for the assessment of building energy functionality**

Following the developed technology and the traditional building design, two design processes were implemented. In order to compare how each of them meet the main functional requirement – to minimize the building energy consumption – the energy modelling was performed, and the energy indicators were determined. While making the matrices of functional requirements – design parameters, the main attention was drawn on the aim to reduce the heating and cooling costs, therefore, the comparison also focuses on these components.

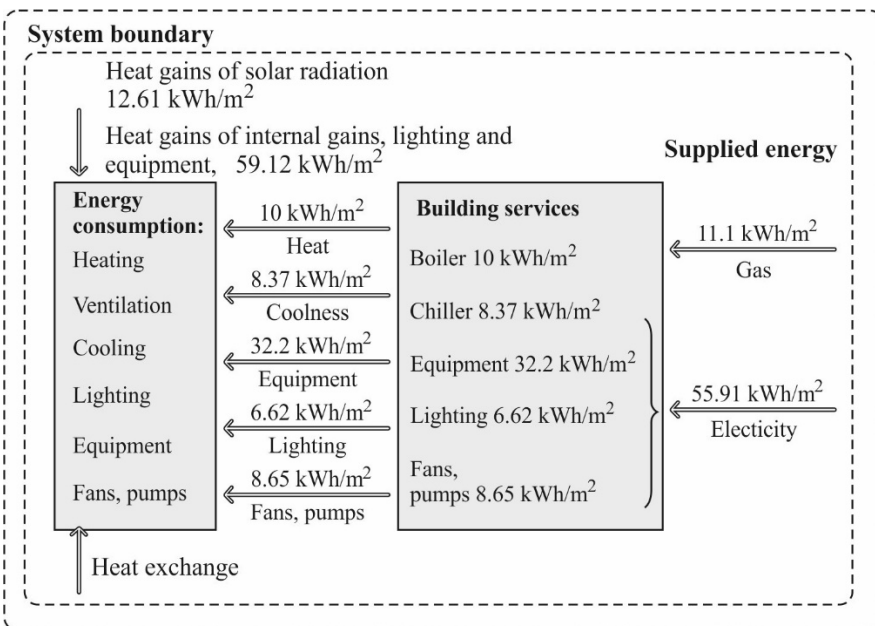
The energy balances of both buildings are given in Figure S.3.1 and Figure S.3.2.

As can be seen from Figure S.3.1, the energy balance of the building, designed according to the developed technology, presents the heat and electricity consumption of the building as well as additional heat gains due to solar radiation (through transparent partitions), and due to internal gains (lighting, electrical appliances).

The energy balances show that the main functional requirement to minimize the building energy consumption includes the following components: energy consumption for heating (gas), electricity consumption for cooling, appliances, lighting, ventilators and pumps. In both cases, the building is heated and cooled by fancoils. Electricity is supplied from urban networks and the heat is produced by a gas boiler.



**Fig. S.3.1.** The energy balance of a building, designed by developed Conceptual Building Design Technology



**Fig. S.3.2.** The energy balance of a building, designed by traditional building design process

Table S.3.1 shows the comparison of energy efficiency of two design processes.

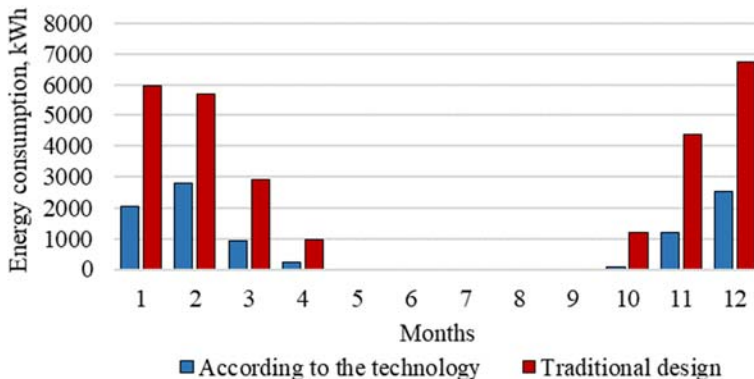
The results of Table S.3.1. demonstrate that the technical results are not unambiguously better in case of the developed technology, however, the integrated primary energy (PE) indicator is better its case.

**Table S.3.1.** The comparison of the efficiency of two design processes

Energy consumptions	According to the technology	According to the traditional design	Advantages (+)/disadvantages (-) of the technology
For heating, kWh/m <sup>2</sup>	4,6	14,3	>100 %
For cooling, kWh/m <sup>2</sup>	8,9	11,78	24 %
For lighting, kWh/m <sup>2</sup>	11,71	6,6	-77 %
For fans and pumps, kWh/m <sup>2</sup>	9	10,9	17 %
PE, kWh/m <sup>2</sup>	88	98	11 %

In the given case, the building, which was developed according to the proposed technology, was more efficient in respect of almost all parameters, i.e., only the energy consumption for lighting was characterized by worse indicators. However, the balance components, aimed to be improved, i.e., the energy consumption for heating and cooling, show their advantages over the results of the traditional building design.

It also distinguishes two indicators: energy consumption for heating – it is almost 3 times lower, and energy consumption for lighting is almost 2 times higher.



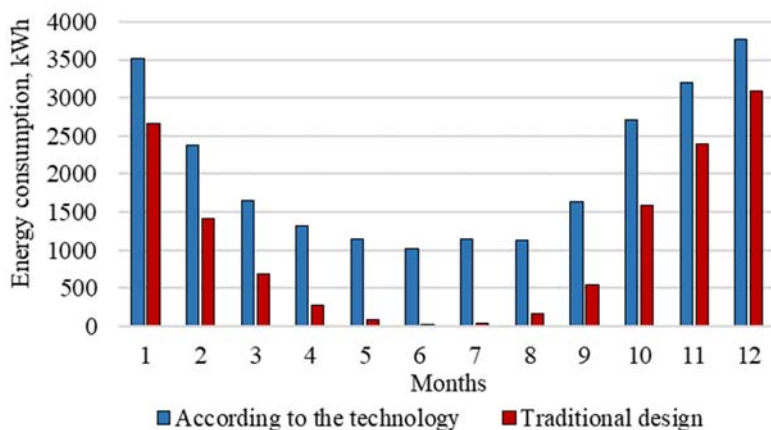
**Fig. S.3.3.** The comparison of annual energy consumption for heating of buildings, designed by traditional process and developed Conceptual Building Design Technology

In different months (Figure S.3.3), the energy consumption of the building, designed according to the technology, was from 2 to several times superior. The highest difference emerges at the beginning of the heating season. Although in October, solar heat gains were

62% higher in the building, designed by the traditional process (Figure S.3.6), larger glazing areas, poorer thermal properties and lower index of compactness result in higher energy consumption for heating not only in October, but throughout the season.

Figure S.3.4 presents the change of energy consumption for lighting. Higher energy consumption was found for the building, designed according to the technology, especially during summer period. The main reasons of this include the fact that the glazing areas of the building, designed according to the technology, are smaller, therefore, less light goes in, as well as because of the provided sun protection measures, i.e., canopies and automated outdoor blinds. Automated outdoor blinds are used only in summer, when the indoor temperature exceeds 24 °C.

In addition, although the building, designed according to the technology, is characterized by superior thermal properties, it still worse by its light transmittance factor. This is mainly due to the operation of outdoor blinds during the cooling season – in May-September.

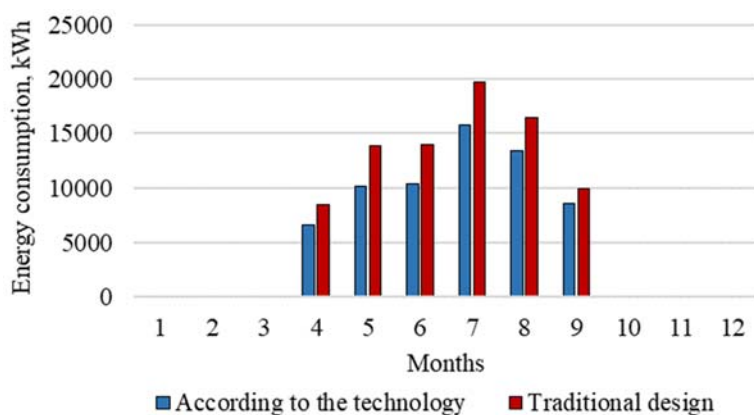


**Fig. S.3.4.** The comparison of annual energy consumption for lighting of buildings, designed by traditional process and developed Conceptual Building Design Technology

While analyzing the monthly energy consumption for cooling (Figure S.3.5) of two buildings, it is evident that the indicators of the building, designed according to technology, were significantly better – ranging from 14 to 27%, subject to a month. It is due to several reasons – different shapes of the buildings, smaller glazing area, better properties of glazing, the use of automated sun protections in summer. The highest differences emerge in May and June.

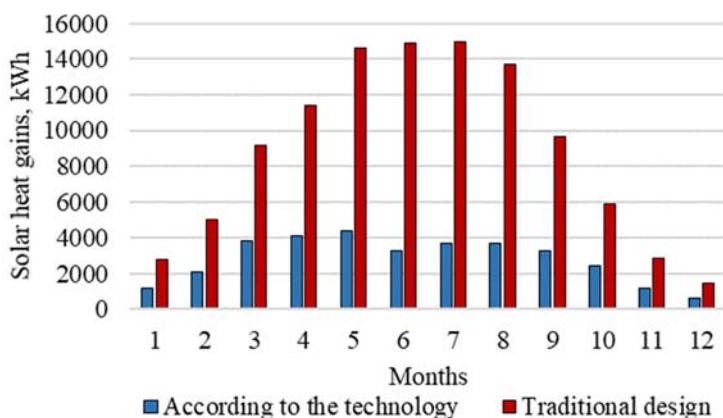
QFD second-level matrices revealed that in order to minimize the building energy consumption, one of the most important lower level requirements is to minimize heat losses through the envelope (as Figure S.3.3 shows, it reduced the heating costs most) and to control the undesirable solar gains, which mostly influence the cooling costs.

Although additional solar gains in winter reduce heating costs, in order these functional requirements do not contradict each other and satisfy the Independence Axiom, the automated control for the outdoor blinds, proposed according to the technology, was intended only during summer season, when the indoor comfort temperature of 24 °C is exceeded.



**Fig. S.3.5.** The comparison of annual energy consumption for cooling of buildings, designed by traditional process and developed Conceptual Building Design Technology

The comparison of annual solar gains reveals the solar gains are two – four times lower in the building, designed according to technology. The highest difference emerges in summer season due to the outdoor blinds.



**Fig. S.3.6.** The comparison of annual solar gains of buildings, designed by traditional process and developed Conceptual Building Design Technology

In summary, it might be stated that application of the technology allows for faster search of the solution that meets the initial requirements. In this case, the building, designed by traditional process, was superior only in respect of one aspect – lower energy consumption for lighting. However, this component was not focused on, while making the matrices of functional requirements-design parameters.

Modelling results revealed that the energy consumption for heating (after reducing the heat losses through the envelope) is almost 3 times lower, and the energy consumption for cooling – almost 4 times lower in the building, designed according to the technology.

In case of more consistent and detailed analysis, each indicator of the energy balance could be specified, and the hierarchies of the functional requirements – design parameters



could be created, in order to fulfil each of them. In this case, a small example was selected to demonstrate a sequence of the technology and to show its advantages.

## General conclusions

1. The research analysis shows, that the Integrated Building Design (IBD) principles and the digital design tools are considered as one of the most important factors in the sustainable building design. The coherence of their interaction is still lacking in formalized procedures and therefore remains a major challenge in the context of the common architectural-structural solutions of the buildings and their energy functionality and customer expectations.

2. The detailed 6-step sequence for the search of a sustainable solution was developed for the pre-design and preliminary design stages. Validation of the technology showed, that due to unique characteristics of QFD and AP, the developed building sustainable solution search algorithm allows for identifying and matching the initial requirements of the customer with the capabilities of the design team at the early stage. In addition, by incorporating digital design and modelling tools, it allows to develop the energy-functional concept building design oriented towards the initial requirements.

3. The buildings, designed during the traditional design process and IBD with application of the developed technology, were compared. It was found out that the building envelope, designed by new technology, according to the given functional requirement, was more energy efficient and more oriented towards the initial requirements:

a) it was determined that the initial approach to minimize the energy consumption reduced the heating costs by almost 3 times and cooling costs by almost a quarter;

b) application of the solutions, provided in the technology, reduced PE consumption by 9%;

c) following the design solutions, developed in the technology, undesirable solar gains were reduced from 2 to 4 times.

4. Application of the proposed technology algorithm at the current level requires new competencies and/or human resources. The technology algorithm testing revealed that the design solutions, which fail to satisfy the Independence Axiom, are possible in step 3. They may require additional solution search iterations. The identification of other possible drawbacks requires the accumulation of critical mass of information by using the algorithm in practice.



---

## Priedai\*

**A priedas.** Atliktų empirinių tyrimų integruoto pastato projektavimo tema rezultatai

**B priedas.** Funkcinių reikalavimų ir dizaino parametrų hierarchijų sudarymo rezultatai

**C priedas.** Funkcinių ir dizaino parametrų ryšių nustatymo rezultatai

**D priedas.** Sąžiningumo deklaracija

**E priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

**F priedas.** Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

---

\* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Vilūnė LAPINSKIENĖ

PASTATŲ ENERGINIO FUNKCIONALUMO VERTINIMAS  
INTEGRUOTAME PASTATO PROJEKTAVIME

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
statybos inžinerija (T 002)

THE ASSESSMENT OF BUILDING ENERGY FUNCTIONALITY  
IN THE INTEGRATED BUILDING DESIGN

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Civil Engineering (T 002)

2019 07 22. 12,5 sp. I. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“,  
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius